

ISSN 0205-9614

Номер 1

Январь–Февраль 2025



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2025

Использование космической информации о Земле

Вертикальная структура антарктического полярного вихря во время внезапных стратосферных потеплений 1988, 2002 и 2019 гг. по данным спутниковых наблюдений <i>В. В. Зуев, Е. С. Савельева, А. В. Павлинский</i>	3
Воздействие крупного извержения вулкана Шивелуч (апрель 2023 г., Камчатка) на экосистемы: масштабы погребения и поражения лесов по спутниковым данным <i>С. Ю. Гришин</i>	16
Исследование закономерностей динамики морфологической структуры абразионных берегов криолитозоны на основе комплексирования математического моделирования и космической съемки <i>А. С. Викторов</i>	25
Картирование гидротермально-метасоматических изменений для прогнозирования золоторудной минерализации на основе обработки набора данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Landsat 8 для территории восточного склона Полярного Урала <i>Ю. Н. Иванова</i>	39
Применение материалов космической съемки Ресурс-П, Канопус-ПСС, ASTER и Landsat для прогнозирования уран-молибденового и хромито-платинового оруденения на Полярном Урале <i>Г. А. Миловский, А. Д. Апарин, А. Р. Ибрагимов, А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен</i>	54
Структура вод в период нагульных миграций тихоокеанского кальмара в Японском море по спутниковым данным <i>А. А. Никитин, И. Л. Цыгышева, Н. М. Мокрин</i>	70
Сезонные и межгодовые вариации температуры поверхности океана в районе Северных Курильских островов по спутниковым данным <i>Г. В. Шевченко, Ж. Р. Цхай, Д. М. Ложкин</i>	84
Правила для авторов	98

Contents

No. 1, 2025

Utilization of the Earth Space Data

Vertical Structure of the Antarctic Polar Vortex During Sudden Stratospheric Warmings in 1988, 2002 and 2019 According to Satellite Observations <i>V. V. Zuev, E. S. Savelieva, A. V. Pavlinsky</i>	3
Impact of a Major Eruption of the Shiveluch Volcano (April 2023, Kamchatka) on Ecosystems: The Extent of Burial and Destruction of Forests According to Satellite Data <i>S. Yu. Grishin</i>	16
Study of Dynamics Regularities for Morphological Pattern of Abrasion Shores of Cryolithozone Based on Complexing Mathematical Modeling and Space Imagery <i>A. S. Victorov</i>	25
Mapping of Hydrothermal-Metasomatic Alteration for Prediction Gold Mineralization Based on Processing a Dataset of the Landsat 8 Remote Sensing Spacecraft for the Territory of the Eastern Slope of the Polar Urals <i>J. N. Ivanova</i>	39
The Use of Space Survey Materials Resurs-P, Canopus-PSS, ASTER and Landsat for Forecasting Uranium-Molybdenum and Chromite-Platinum Mineralization in the Polar Urals <i>G. A. Milovsky, A. D. Aparin, A. R. Ibragimov, A. A. Kirsanov, K. L. Lipiyainen</i>	54
Structure of Water During the Feeding Migration Period of the Pacific Squid in the Sea of Japan According to Satellite Data <i>A. A. Nikitin, I. L. Tsypysheva, N. M. Mokrin</i>	70
Seasonal and Interannual Variations in Ocean Surface Temperature in the Area of the Northern Kuril Islands According to Satellite Data <i>G. V. Shevchenko, Zh. R. Tshay, D. M. Lozhkin</i>	84
Notes to the Authors	98

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ 1988, 2002 И 2019 гг. ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2025 г. В. В. Зуев¹, Е. С. Савельева^{1,2,*}, А. В. Павлинский¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

*E-mail: esav.pv@gmail.com

Поступила в редакцию 03.06.2024 г.

В работе с использованием спутниковых данных MERRA-2 и данных реанализа ERA5 рассмотрена вертикальная структура антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. В 1988 и 2019 гг. наблюдалось значительное смещение полярного вихря, в 2002 г. – расщепление. Показаны различия в вертикальной динамике антарктического полярного вихря при ВСП, регистрируемом вследствие смещения (1988 и 2019 гг.) или расщепления вихря (2002 г.). Ослабление, смещение и последующее разрушение полярного вихря в 1988 и 2019 гг. наблюдалось сначала в верхней стратосфере и затем постепенно распространялось в среднюю и нижнюю стратосферу в течение месяца. Таким образом, ВСП в нижней стратосфере предвещалось значительным смещением вихря в верхней стратосфере за месяц до события. В свою очередь в 2002 г. до расщепления полярный вихрь был достаточно сильным и устойчивым на всех стратосферных уровнях, расщепление наблюдалось одновременно в средней и верхней стратосфере, после чего в верхней стратосфере вихрь разрушился, а в нижней и средней просуществовал еще месяц. Во всех случаях наблюдалось снижение скорости ветра по границе вихря, увеличение температуры внутри вихря, разрушение частиц полярных стратосферных облаков и уменьшение площади озоновой дыры начиная с конца августа. Более раннее затягивание озоновой дыры произошло соответственно 30 октября 1988 г., 9 ноября 2002 г. и 6 ноября 2019 г.

Ключевые слова: антарктический полярный вихрь, внезапные стратосферные потепления, полярные стратосферные облака, динамический барьер

DOI: 10.31857/S0205961425010011, EDN: DHQRQZ

ВВЕДЕНИЕ

Стратосферные полярные вихри, формирующиеся над полярными областями поздней весной, представляют собой крупномасштабные циклональные образования, распространяющиеся от тропопаузы в мезосферу и существующие по весну (Waugh, Polvani, 2010; Waugh et al., 2017). Устойчивость полярного вихря в зимне-весенний период определяет масштабы и глубину весенней полярной озоновой аномалии (Newman et al., 2004). Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, препятствующий меридиональному переносу стратосферного озона из тропических и средних широт в полярную область (Manney et al., 2022). При этом внутри полярного вихря при экстремально низких температурах (< -78 °C) формируются полярные стратосферные облака (ПСО), на поверхности и в объеме которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора. При появлении солнечного излучения над

полярным регионом молекулярный хлор фотодиссоциирует с образованием радикалов хлора, вступающих в каталитический цикл разрушения озона (Solomon, 1999).

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) представляют собой резкое потепление в полярной стратосфере в результате сильного смещения или расщепления стратосферного полярного вихря под действием вертикально распространяющихся планетарных волн (Ayarzagüena et al., 2019). Планетарные волны распространяются в среднюю стратосферу, где движутся в восточном направлении, противоположно направленно западному движению полярного вихря, что приводит к возмущению полярного вихря и его последующему смещению или расщеплению, сопровождающимся ВСП (Kuttippurath, Nikulin, 2012). Арктический полярный вихрь практически ежегодно подвергается влиянию планетарных волн, знаменующемуся ВСП (Агеева и др., 2017). В свою очередь в Антарктике за период с 1979 по 2023 гг. ВСП регистрировалось лишь трижды –

в 1988, 2002 и 2019 гг. (Roy et al., 2022). Первое из них часто не учитывается в статистике событий ВСП над Антарктикой, т.к. значительное смещение полярного вихря в 1988 г. наблюдалось на этапе его ослабления при уменьшении площади. Однако динамика полярного вихря в 1988 и 2019 гг. имеет много схожих черт, при этом второй случай является признанным событием ВСП (Safieddine et al., 2020; Kogure et al., 2021; Noguchi et al., 2020).

Более раннее ослабление и разрушение антарктического полярного вихря весной 2019 г. было рассмотрено в ряде работ (Goncharenko et al., 2020; Klekociuk et al., 2021; Eswaraiah et al., 2020; Shen et al., 2022). Аномальное ослабление полярного вихря в 2019 г. наблюдалось с сентября по октябрь, после чего регистрировалось ВСП в начале ноября и последующее разрушение вихря в первой половине ноября, примерно на месяц раньше, чем в среднем за 40 лет (Wargan et al., 2020; Milinevsky et al., 2019). Динамика ослабления полярного вихря в 2019 г. была сопоставима с динамикой вихря в 2002 г., когда произошло его расщепление (Lim et al., 2021). В 2002 г. расщепление антарктического полярного вихря и последующее ВСП наблюдались 25 сентября (Newman, Nash, 2005; Stolarski et al., 2005; Hoppel et al., 2003; Grooß et al., 2005). Необратимый характер в динамических изменениях полярного вихря весной 2002 г. наблюдался со второй половины сентября, при этом первые признаки последующих изменений прослеживались уже с конца августа (Charlton et al., 2005; Feng et al., 2005; Manney et al., 2005). Динамика полярного вихря весной 1988 г. имела схожую природу ослабления, что и в 2019 г., смещение вихря, знаменующееся ВСП, наблюдалось в первых числах ноября (Hirota et al., 1990; Grytsai et al., 2008). Целью данной работы является исследование вертикальной структуры антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг., а также динамики ПСО и озоновой дыры по данным спутниковых наблюдений.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Среднесуточные данные о скорости зонального ветра у 60° ю.ш., минимальной температуре в области $50-90^\circ$ ю.ш. на уровне 50 гПа, объеме ПСО в области $60-90^\circ$ ю.ш. и площади озоновой дыры (область, характеризующаяся значениями общего содержания озона (ОСО) ниже 220 ед. Д.) в области $40-90^\circ$ ю.ш. за период с 1983 по 2022 гг. получены из архива Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), созданного Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS) на основе спутниковых данных NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>. MERRA-2 — это

первый долгосрочный глобальный реанализ, который усваивает данные космических наблюдений за аэрозолями и представляет их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе (Gelaro et al., 2017). Среднесуточные данные о геопотенциале и скорости зонального и меридионального ветра в области $30-90^\circ$ ю.ш. с горизонтальным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ на уровнях от 100 до 5 гПа за 1988, 2002 и 2019 гг. получены по данным реанализа ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Hersbach et al., 2020), <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>. Для анализа вертикальной динамики антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. поля геопотенциала и скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа рассматривались в индексах. Индексы рассчитывались по формуле $(x-y)/y$, где x — значение геопотенциала (скорости ветра) в точке, y — значение геопотенциала, характеризующее границу полярного вихря (значение скорости ветра, при которой формируется динамический барьер) на рассматриваемом уровне (Zuev, Savelieva, 2024). Динамика рассматриваемых параметров в исследуемые годы сравнивалась с 40-летними климатическими средними за 1983–2022 гг., полученными со среднеквадратичными отклонениями (СКО, σ) и сглаженным FFT-фильтром по 15 точкам.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена динамика характеристик антарктического полярного вихря в зимне-весенний период 1988, 2002 и 2019 гг. Во всех случаях наблюдалось понижение зональной скорости, рост минимальной температуры, снижение объема ПСО и площади озоновой дыры начиная с конца августа. Более раннее “схлопывание” озоновой дыры произошло соответственно 30 октября 1988 г., 9 ноября 2002 г. и 6 ноября 2019 г. В табл. 1 приведены усредненные за сентябрь, октябрь и ноябрь характеристики антарктического полярного вихря в 1988, 2002 и 2019 гг. В 2002 и 2019 гг. наблюдалось более существенное ослабление полярного вихря, чем в 1988 г.: скорость ветра и объем ПСО были в среднем на 40 % и 30 % ниже, несмотря на более высокие значения площади озоновой дыры (рис. 1, табл. 1). На рис. 2–7 приведены поля геопотенциала и скорости ветра в индексах на уровнях от 100 до 5 гПа для дат до, во время и после событий ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. На полях геопотенциала контуром отмечена предполагаемая граница полярного вихря, а на полях скорости ветра — динамический барьер (соответствуют значению “0” на шкале в индексах). В таблице 2 приведены значения площади вихря и средней скорости ветра по границе вихря для рассматриваемых дат до, во время и после событий ВСП 1988, 2002 и 2019 гг. на уровнях от 100 до 5 гПа.

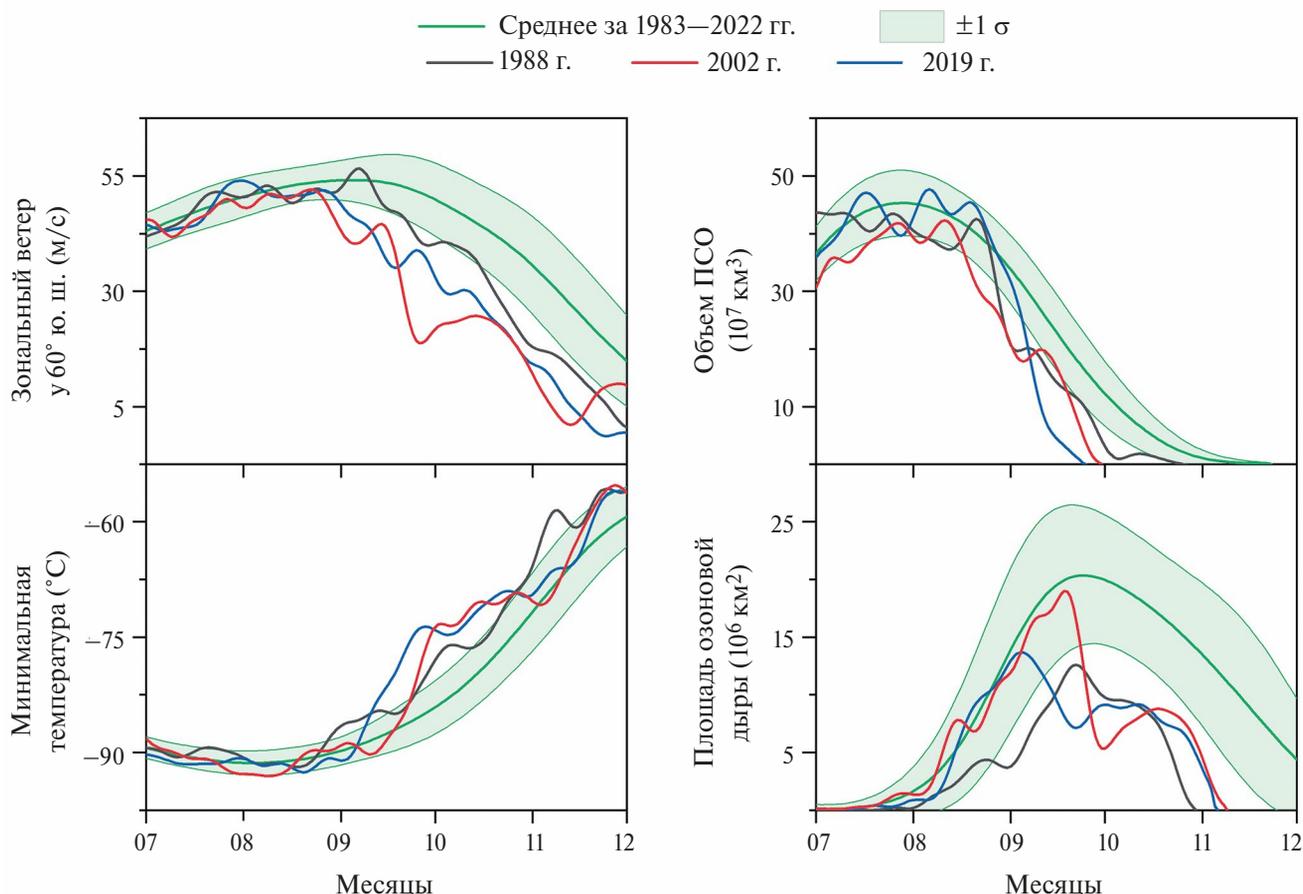


Рис. 1. Внутригодовой ход скорости зонального ветра у 60° ю.ш., минимальной температуры в области 50–90° ю.ш. на уровне 50 гПа, объема ПСО в области 60–90° ю.ш. и площади озоновой дыры в области 40–90° ю.ш. с июля по ноябрь 1988, 2002 и 2019 гг. на фоне средних значений за 1983–2022 гг. с СКО ($\pm 1\sigma$).

ВСП 1988 г. Весной 1988 г. значительное смещение полярного вихря, знаменующееся ВСП, наблюдалось 1 ноября в нижней стратосфере (рис. 2, 3). В средней и верхней стратосфере значительное смещение вихря проявлялось уже во второй половине октября, при этом в начале ноября на уровнях от 10 гПа и выше полярный вихрь уже не прослеживался (табл. 2). Ослабление полярного вихря в 1988 г. началось в первых числах октября в верхней стратосфере. На рис. 2, 3 можно видеть, как смещение и ослабление полярного вихря, начавшееся

в верхней стратосфере, постепенно проявляется на уровнях ниже, пока не достигает нижней стратосферы в начале ноября.

ВСП 2002 г. В первой половине сентября 2002 г. полярный вихрь был достаточно сильным и устойчивым, при этом характеризовался большей площадью и скоростью ветра по границе вихря в верхней и средней стратосфере, по сравнению с нижней (табл. 2, рис. 4, 5). 25 сентября расщепление вихря произошло в средней и верхней стратосфере (на уровнях

Таблица 1. Среднемесячные значения скорости зонального ветра у 60° ю.ш., минимальной температуры в области 50–90° ю.ш. на уровне 50 гПа, объема ПСО в области 60–90° ю.ш. и площади озоновой дыры в области 50–90° ю.ш. с сентября по ноябрь 1988, 2002 и 2019 гг.

	Зональный ветер, м/с			Минимальная температура, °C			Объем ПСО, 10 ⁷ км ³			Площадь озоновой дыры, 10 ⁶ км ²		
	1988	2002	2019	1988	2002	2019	1988	2002	2019	1988	2002	2019
Сентябрь	48.7	34.4	40.4	-84.2	-85.9	-81.8	14.4	12.8	9.3	9.2	14.3	10.4
Октябрь	32.5	22.0	24.9	-73.6	-71.1	-71.6	0.9	0.1	0.2	6.4	7.7	7.9
Ноябрь	11.0	6.1	4.9	-59.0	-62.7	-62.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5

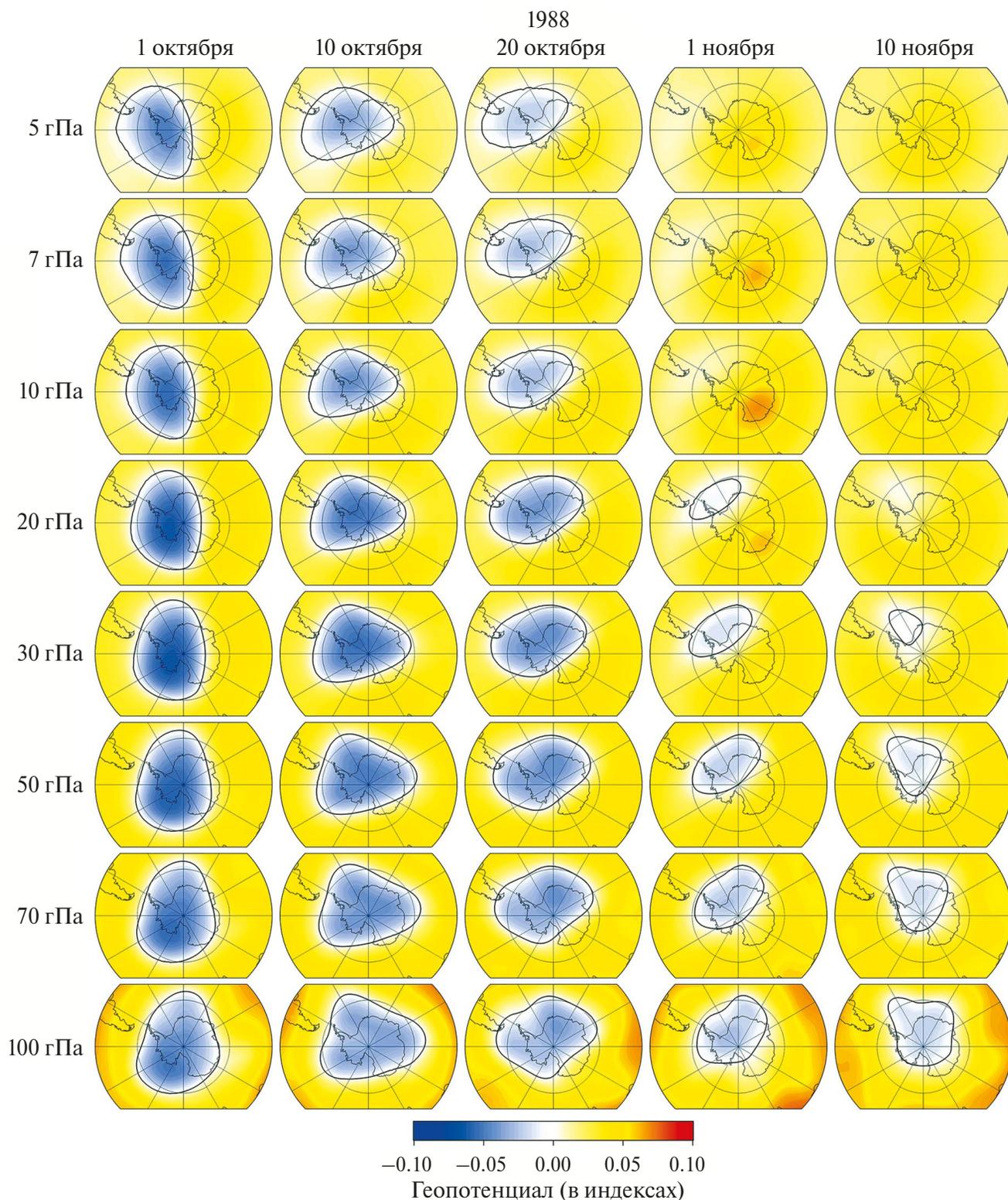


Рис. 2. Поля геопотенциала на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 1988 г.

от 20 гПа и выше), при этом в нижней стратосфере полярный вихрь принял форму “восьмерки”. После расщепления в верхней стратосфере сформировался небольшой антициклон, одна из частей по-

лярного вихря “растворилась”, вторая постепенно разрушилась. В свою очередь в нижней и средней стратосфере полярный вихрь частично восстановился и просуществовал еще месяц.

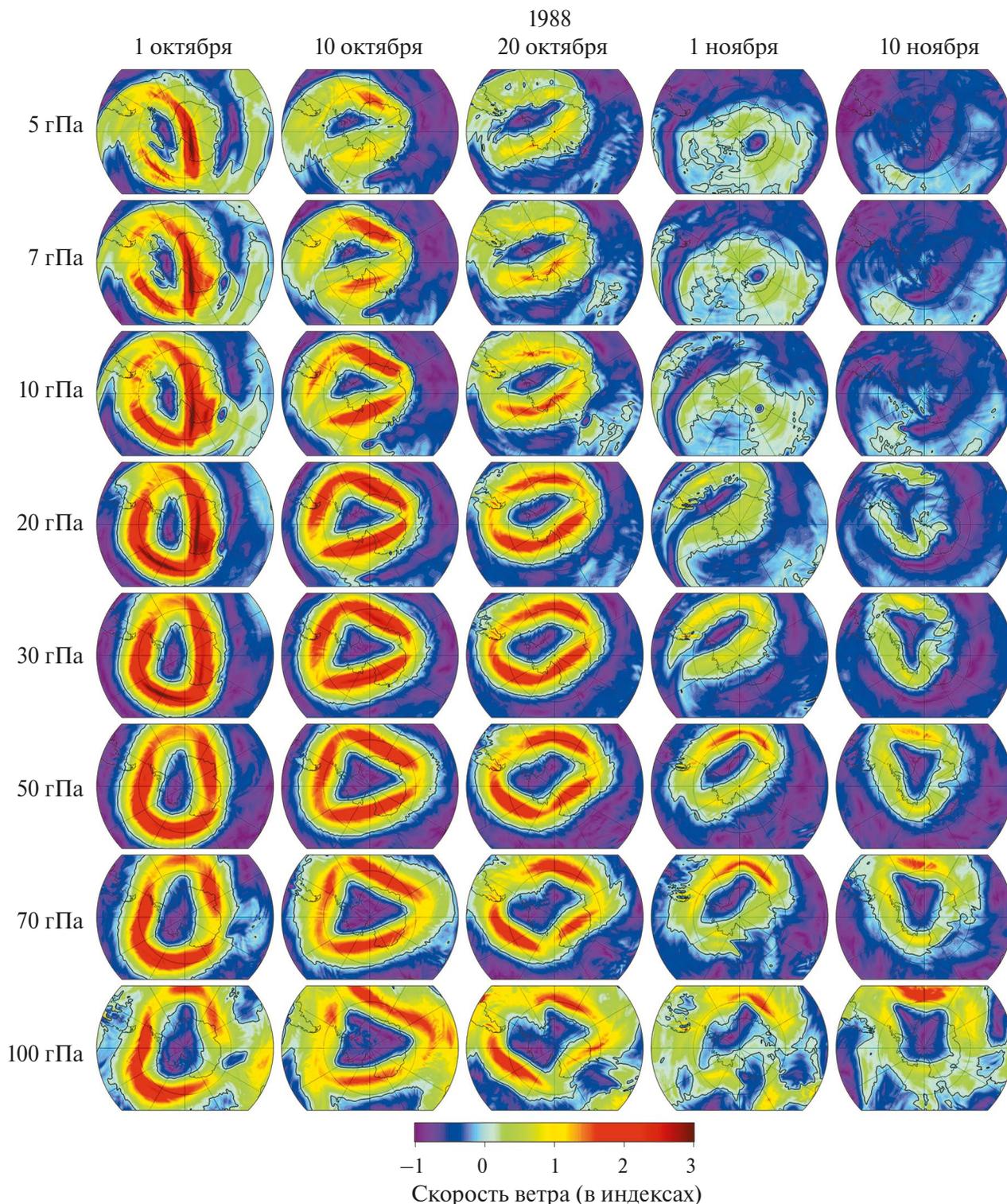


Рис. 3. Поля скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 1988 г.

ВСП 2019 г. Динамика вихря весной 2019 г. была в значительной степени схожа с динамикой при ВСП 1988 г. Ослабление и смещение вихря начало проявляться в верхней стратосфере еще в начале октября и постепенно распространялось в сред-

нюю и нижнюю стратосферу (рис. 6, 7). ВСП наблюдалось 1 ноября на уровнях 20 гПа и ниже, в то время как на уровнях от 10 гПа и выше значительное смещение полярного вихря наблюдалось еще во второй половине октября (табл. 2, рис. 6, 7).

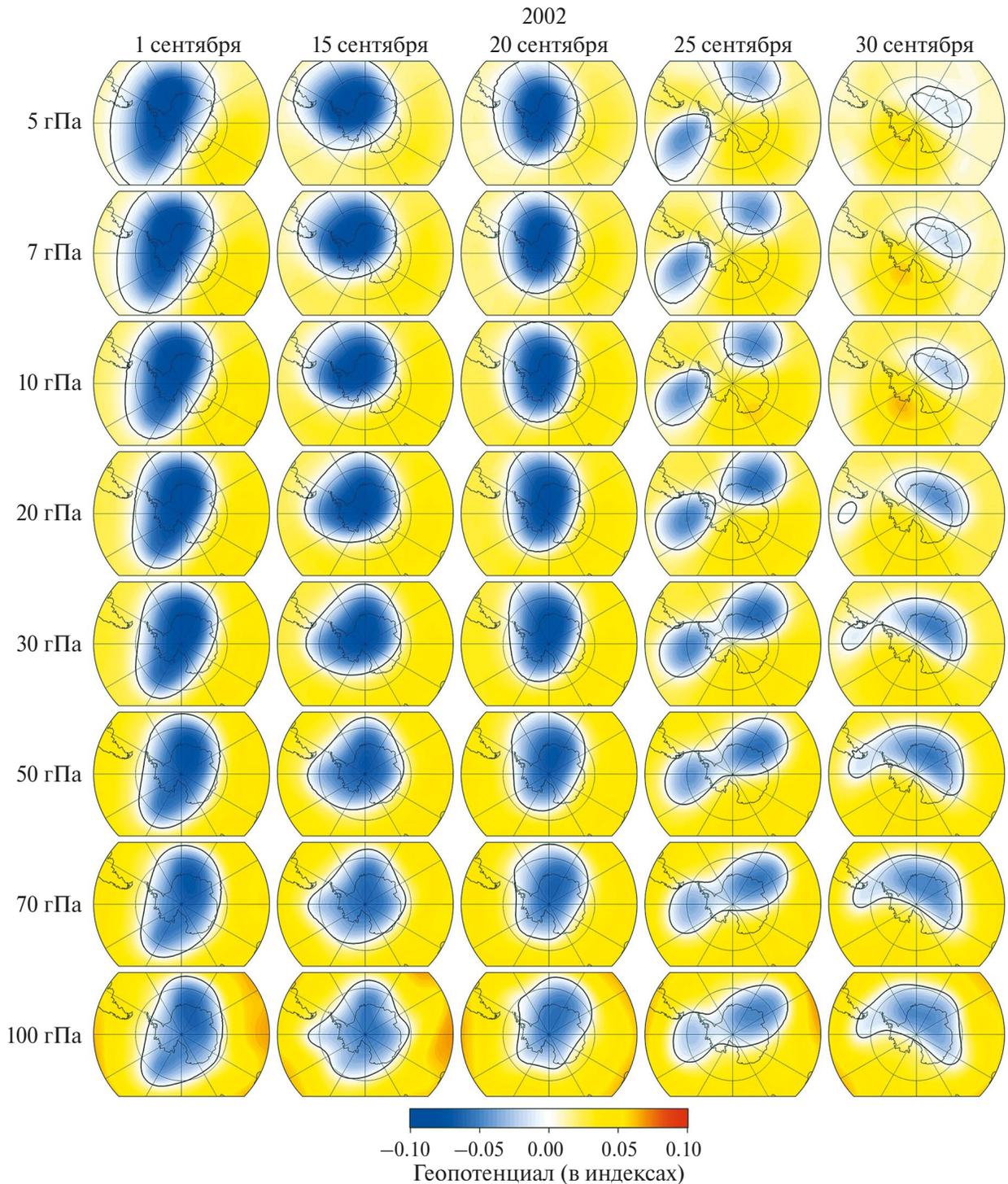


Рис. 4. Поля геопотенциала на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 по 30 сентября 2002 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена вертикальная структура антарктического полярного вихря во время ВСП 1988, 2002 и 2019 гг., а также динамика объема ПСО и площади озоновой дыры по данным спутниковых наблюдений. В 1988 и 2019 гг. наблю-

далось значительное смещение полярного вихря, в 2002 г. – расщепление. Объем ПСО и площадь озоновой дыры являются косвенными характеристиками динамики полярного вихря. В рассматриваемые годы практически одновременно, начиная с конца августа, наблюдалось снижение скорости ветра по границе вихря, увеличение температуры

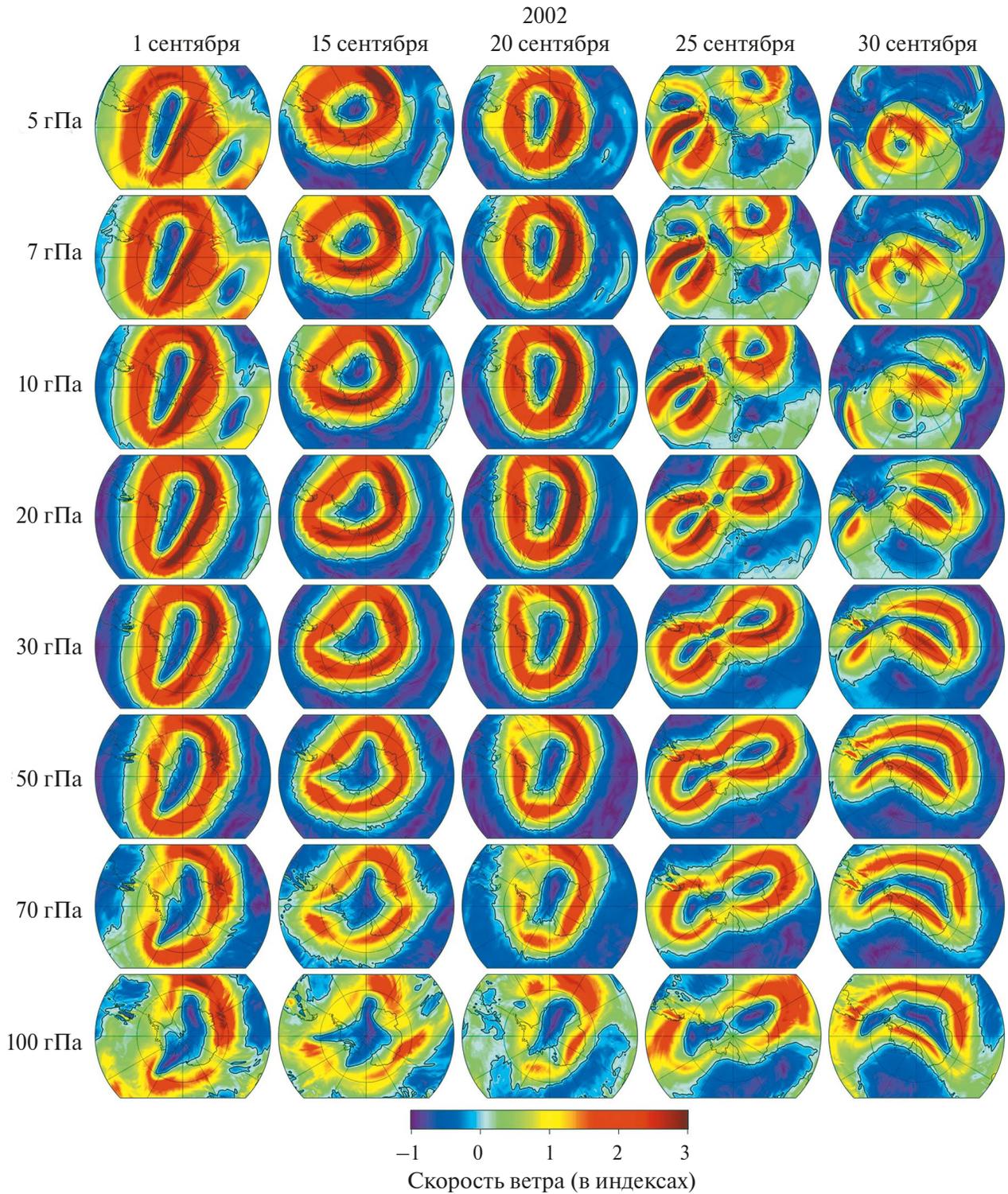


Рис. 5. Поля скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 по 30 сентября 2002 г.

внутри вихря, разрушение частиц ПСО и уменьшение площади озоновой дыры. Более раннее затягивание озоновой дыры произошло соответственно 30 октября 1988 г., 9 ноября 2002 г. и 6 ноября 2019 г. При этом в 2002 и 2019 гг. наблюдалось более су-

щественное ослабление полярного вихря: скорость ветра и объем ПСО были в среднем на 40 % и 30 % ниже, чем в 1988 г.

Были выявлены разные тенденции в вертикальной динамике антарктического полярного

Таблица 2. Площадь вихря и средняя скорость ветра по границе вихря до, во время и после ВСП 1988, 2002 и 2019 гг.

	Площадь вихря, млн. км ²						Скорость ветра по границе вихря, м/с					
	01.10.1988	10.10.1988	20.10.1988	01.11.1988	10.11.1988	01.10.1988	10.10.1988	20.10.1988	01.11.1988	10.11.1988		
5 гПа	28.8	26.1	20.7			66.8	49.5	46.4				
7 гПа	28.0	24.8	20.1			66.4	56.7	52.9				
10 гПа	27.1	23.8	19.4			72.3	65.8	54.7				
20 гПа	30.2	28.4	25.3			70.3	69.9	60.8				
30 гПа	31.2	30.2	27.2	11.5		66.1	66.8	60.0	33.8			
50 гПа	32.4	31.7	28.4	14.9	11.7	57.5	57.0	53.6	35.3	22.1		
70 гПа	32.9	32.7	28.8	16.5	15.2	50.8	48.6	46.4	31.1	24.3		
100 гПа	50.8	50.5	45.4	37.8	36.3	37.9	37.5	35.5	27.8	28.0		
	01.09.2002	15.09.2002	20.09.2002	25.09.2002	30.09.2002	01.09.2002	15.09.2002	20.09.2002	25.09.2002	30.09.2002		
5 гПа	56.8	40.7	39.2	29.6		59.7	65.8	64.7	66.6			
7 гПа	50.6	38.4	35.3	27.5		62.6	67.9	71.4	70.4			
10 гПа	44.0	35.3	32.2	25.5		69.8	72.5	80.3	72.0			
20 гПа	42.0	35.5	33.7	29.6	16.2	66.8	67.2	75.3	62.4	56.7		
30 гПа	40.6	35.2	33.6	30.6	22.2	63.2	63.7	69.2	60.4	57.0		
50 гПа	38.9	34.7	32.2	29.8	26.5	56.8	55.0	57.2	54.3	56.6		
70 гПа	37.8	34.3	30.5	29.1	27.3	51.3	47.7	49.5	46.9	50.8		
100 гПа	54.3	52.1	45.4	46.7	47.1	38.0	35.0	30.8	31.1	30.8		
	01.10.2019	10.10.2019	20.10.2019	01.11.2019	10.11.2019	01.10.2019	10.10.2019	20.10.2019	01.11.2019	10.11.2019		
5 гПа	22.6	18.2	12.6			45.8	42.7	32.3				
7 гПа	19.3	16.9	12.6			51.8	47.1	37.1				
10 гПа	17.5	15.8	12.2			57.6	53.4	43.0				
20 гПа	21.5	19.9	17.2	11.7		59.7	58.4	52.5	41.1			
30 гПа	23.4	22.1	19.5	14.4		59.3	57.3	51.7	45.0			
50 гПа	25.1	24.6	21.7	16.1	9.2	56.0	54.3	48.9	44.5	31.2		
70 гПа	26.0	26.3	23.0	16.3	10.7	52.3	50.2	43.6	37.4	33.0		
100 гПа	42.0	42.8	42.1	34.6	27.7	33.2	34.3	28.4	25.4	25.9		

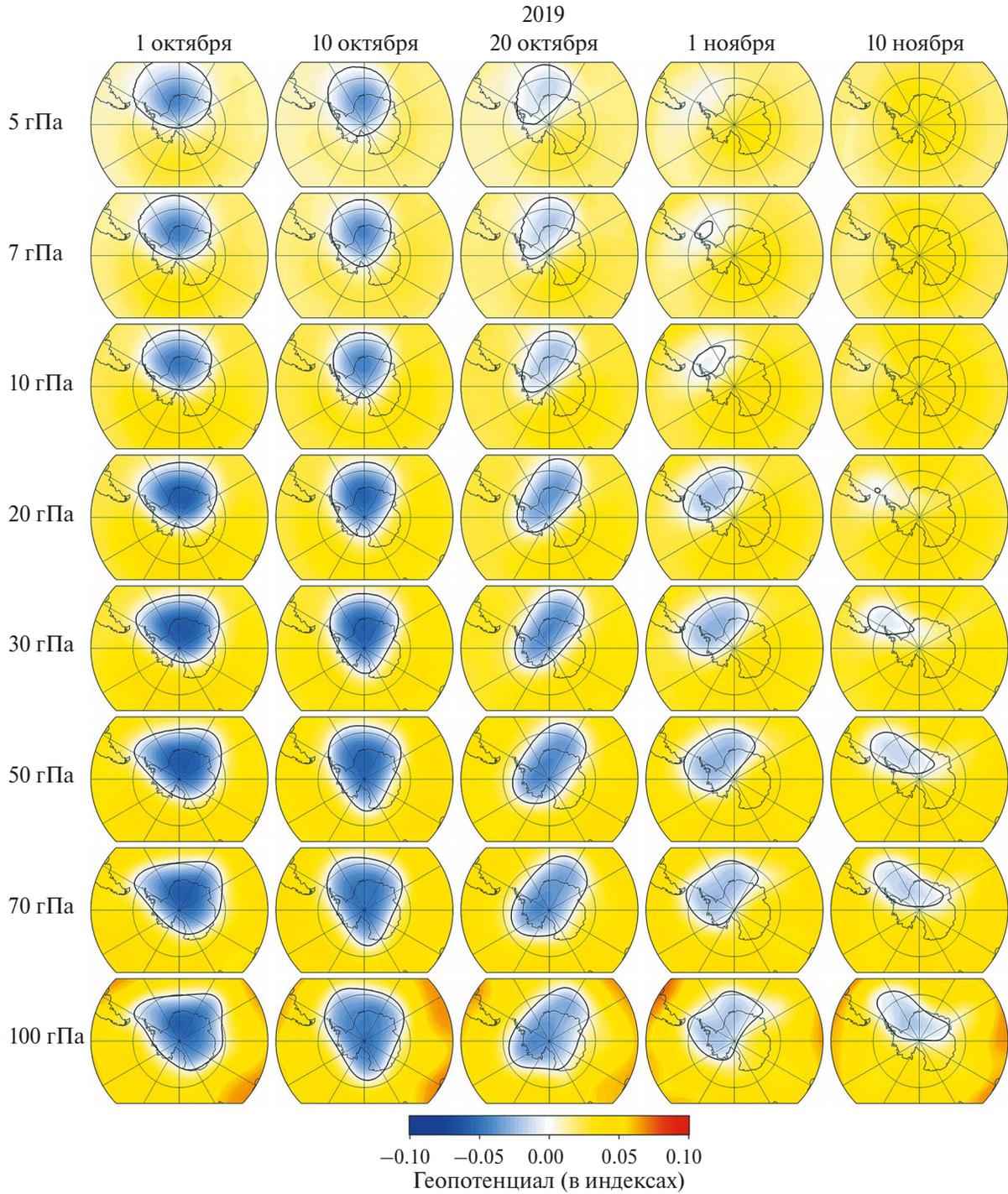


Рис. 6. Поля геопотенциала на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 2019 г.

вихря при ВСП, регистрируемом вследствие смещения (1988 и 2019 гг.), или расщеплении вихря (2002 г.). Ослабление, смещение и последующее разрушение полярного вихря в 1988 и 2019 гг. наблюдалось сначала в верхней стратосфере и затем постепенно распространялось в среднюю и нижнюю стратосферу в течение месяца. При этом ВСП в нижней стратосфере предвещало значи-

тельным смещением вихря в верхней стратосфере за месяц до события. В свою очередь в 2002 г. до расщепления полярный вихрь был достаточно сильным и устойчивым на всех стратосферных высотах, расщепление произошло в средней и верхней стратосфере, после чего в верхней стратосфере вихрь разрушился, а в нижней и средней просуществовал еще 1 месяц.

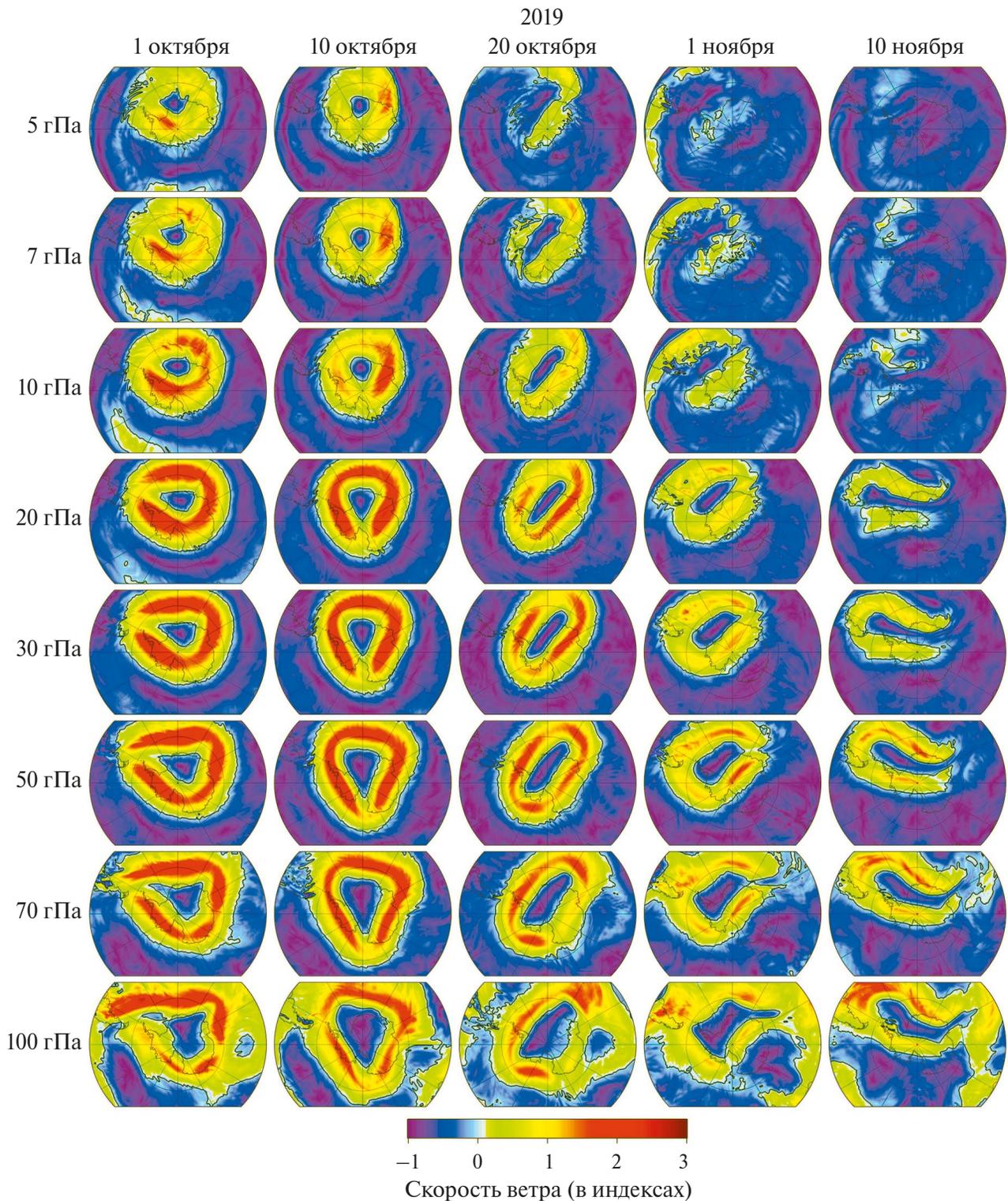


Рис. 7. Поля скорости ветра на уровнях от 100 до 5 гПа над Антарктикой с 1 октября по 10 ноября 2019 г.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00273, <https://rscf.ru/project/23-17-00273/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ // Из-

- вестия РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555. doi:10.7868/S0003351517050014.
- Ayarzagüena B., Palmeiro F.M., Barriopedro D., Calvo N., Lange-matz U., Shibata K. On the representation of major stratospheric warmings in reanalyses // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. № 14. P. 9469–9484. DOI: 10.5194/acp-19-9469-2019.
- Charlton A.J., O'Neill A., Lahoz W.A., Berrisford P. The splitting of the stratospheric polar vortex in the Southern Hemisphere, September 2002: Dynamical evolution // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 590–602. DOI: 10.1175/JAS-3318.1.
- Eswaraiah S., Kim J.-H., Lee W., Hwang J., Kumar K.N., Kim Y.H. Unusual changes in the Antarctic middle atmosphere during the 2019 warming in the Southern Hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 19. P. e2020GL089199. DOI: 10.1029/2020GL089199.
- Feng W., Chipperfield M.P., Roscoe H.K., Remedios J.J., Waterfall A.M., Stiller G.P., Glatthor N., Höpfner M., Wang D.-Y. Three-dimensional model study of the Antarctic ozone hole in 2002 and comparison with 2000 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 822–837. DOI: 10.1175/JAS-3335.1.
- Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Goncharenko L.P., Harvey V.L., Greer K.R., Zhang S.-R., Coster A.J. Longitudinally dependent low-latitude ionospheric disturbances linked to the Antarctic sudden stratospheric warming of September 2019 // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 8. P. e2020JA028199. DOI: 10.1029/2020JA028199.
- Groß J.-U., Konopka P., Müller R. Ozone chemistry during the 2002 Antarctic vortex split // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 860–870. DOI: 10.1175/JAS-3330.1.
- Grytsai A.V., Evtushevsky O.M., Milinevsky G.P. Anomalous quasi-stationary planetary waves over the Antarctic region in 1988 and 2002 // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. № 5. P. 1101–1108. DOI: 10.5194/angeo-26-1101-2008.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hirota I., Kuroi K., Shiotani M. Midwinter warmings in the southern hemisphere stratosphere in 1988 // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 1990. V. 116. № 494. P. 929–941. DOI: 10.1002/qj.49711649407.
- Hoppel K., Bevilacqua R., Allen D., Nedoluha G., Randall C. POAM III observations of the anomalous 2002 Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 7. P. 1394. DOI: 10.1029/2003GL016899.
- Klekociuk A.R., Tully M.B., Krummel P.B., Henderson S.I., Smale D., Querel R., Nichol S., Alexander S.P., Fraser P.J., Nedoluha G. The Antarctic ozone hole during 2018 and 2019 // *J. South. Hemisph. Earth Syst. Sci.* 2021. V. 71. № 1. P. 66–91. DOI: 10.1071/ES20010.
- Kogure M., Yue J., Liu H. Gravity wave weakening during the 2019 Antarctic stratospheric sudden warming // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. № 8. P. e2021GL092537. DOI: 10.1029/2021GL092537.
- Kuttippurath J., Nikulin G. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. № 17. P. 8115–8129. DOI: 10.5194/acp-12-8115-2012.
- Lim E.-P., Hendon H.H., Butler A.H., Thompson D.W.J., Lawrence Z.D., Scaife A.A., Shepherd T.G., Polichchouk I., Nakamura H., Kobayashi C., Comer R., Coy L., Dowdy A., Garreaud R.D., Newman P.A., Wang G. The 2019 Southern Hemisphere stratospheric polar vortex weakening and its impacts // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2021. V. 102. № 6. P. E1150–E1171. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0112.1.
- Manney G.L., Sabutis J.L., Allen D.R., Lahoz W.A., Scaife A.A., Randall C.E., Pawson S., Naujokat B., Swinbank R. Simulations of dynamics and transport during the September 2002 Antarctic major warming // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 690–707. DOI: 10.1175/JAS-3313.1.
- Manney G.L., Millán L.F., Santee M.L., Wargan K., Lambert A., Neu J.L., Werner F., Lawrence Z.D., Schwartz M.J., Livesey N.J., Read W.G. Signatures of anomalous transport in the 2019/2020 Arctic stratospheric polar vortex // *J. Geophys. Res.* 2022. V. 127. № 20. P. e2022JD037407. DOI: 10.1029/2022JD037407.
- Milinevsky G., Evtushevsky O., Klekociuk A., Wang Y., Grytsai A., Shulga V., Ivaniha O. Early indications of anomalous behaviour in the 2019 spring ozone hole over Antarctica // *Int. J. Remote Sens.* 2019. V. 41. № 19. P. 7530–7540. DOI: 10.1080/2150704X.2020.1763497.
- Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R. On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104. DOI: 10.1029/2004GL020596.
- Newman P.A., Nash E.R. The unusual Southern Hemisphere stratosphere winter of 2002 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 614–628. DOI: 10.1175/JAS-3323.1.
- Noguchi S., Kuroda Y., Kodera K., Watanabe S. Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 15. P. e2020GL088743. DOI: 10.1029/2020GL088743.
- Roy R., Kuttippurath J., Lefèvre F., Raj S., Kumar P. The sudden stratospheric warming and chemical ozone loss in the Antarctic winter 2019: comparison with the winters of 1988 and 2002 // *Theor. Appl. Climatol.* 2022. V. 149. P. 119–130. DOI: 10.1007/s00704-022-04031-6.
- Safieddine S., Bouillon M., Paracho A.-C., Jumelet J., Tencé F., Pazmino A., Goutail F., Wespes C., Bekki S., Boynard A., Hadji-Lazaro J., Coheur P.-F., Hurtmans D., Clerbaux C. Antarctic ozone enhancement during the 2019 sudden stratospheric warming event // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 14. P. e2020GL087810. DOI: 10.1029/2020GL087810.
- Shen X., Wang L., Osprey S., Hardiman S.C., Scaife A.A., Ma J. The life cycle and variability of Antarctic weak polar vortex events // *J. Climate.* 2022. V. 35. № 6. P. 2075–2092. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0500.1.
- Solomon S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316. DOI: 10.1029/1999RG900008.
- Stolarski R.S., McPeters R.D., Newman P.A. The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 716–720. DOI: 10.1175/JAS-3338.1.

Wargan K., Weir B., Manney G.L., Cohn S.E., Livesey N.J. The anomalous 2019 Antarctic ozone hole in the GEOS constituent data assimilation system with MLS observations // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 18. P. e2020JD033335. DOI: 10.1029/2020JD033335.

Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric polar vortices. In: Polvani L.M., Sobel A.H., Waugh D.W. (Eds.). *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry* // *Geo-*

physical Monograph Series. 2010. V. 190. P. 43–57. DOI: 10.1002/9781118666630.ch3.

Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M. What is the polar vortex and how does it influence weather? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2017. V. 98. № 1. P. 37–44. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1.

Zuev V.V., Savelieva E.S. Dynamic characteristics of the stratospheric polar vortices // *Dokl. Earth Sci.* 2024. V. 517. № 1. P. 1240–1248. DOI: 10.1134/S1028334X24601895.

Vertical Structure of the Antarctic Polar Vortex During Sudden Stratospheric Warmings in 1988, 2002 and 2019 According to Satellite Observations

V. V. Zuev¹, E. S. Savelieva^{1,2}, A. V. Pavlinsky¹

¹*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Using the MERRA-2 satellite data and ERA5 reanalysis data, we examined the vertical structure of the Antarctic polar vortex during the sudden stratospheric warming events (SSWs) of 1988, 2002 and 2019. The significant displacements of the polar vortex were observed in 1988 and 2019, and the vortex splitting occurred in 2002. Differences in the vertical dynamics of the Antarctic polar vortex during SSWs recorded due to displacement (1988 and 2019) or vortex splitting (2002) are shown. The weakening, displacement and subsequent breakdown of the polar vortex in 1988 and 2019 was observed first in the upper stratosphere, and then gradually spread into the middle and lower stratosphere within a month. Thus, the SSW in the lower stratosphere was preceded by a significant displacement of the polar vortex in the upper stratosphere a month before the event. While in 2002, before the split, the polar vortex was strong and stable at all stratospheric levels, the split was observed simultaneously in the middle and upper stratosphere, after which the vortex collapsed in the upper stratosphere, and existed for another month in the lower and middle stratosphere. In all cases, a decrease in wind speed along the vortex edge, an increase in temperature inside the vortex, melting of particles of polar stratospheric clouds and a decrease in ozone hole area were observed starting in late August. The earlier recovery of ozone hole occurred on 30 October 1988, 9 November 2002 and 6 November 2019, respectively.

Keywords: Antarctic polar vortex, sudden stratospheric warming, polar stratospheric clouds, dynamic barrier

REFERENCES

Ageeva V.Yu., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and impact on the total content of NO₂ and O₃ // *Izv. RAS. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2017. V. 53. № 5. P. 545–555. DOI: 10.7868/S0003351517050014. (In Russian).

Ayarzagüena B., Palmeiro F.M., Barriopedro D., Calvo N., Langematz U., Shibata K. On the representation of major stratospheric warmings in reanalyses // *Atmos. Chem. Phys.* 2019. V. 19. № 14. P. 9469–9484. DOI: 10.5194/acp-19-9469-2019.

Charlton A.J., O'Neill A., Lahoz W.A., Berrisford P. The splitting of the stratospheric polar vortex in the Southern Hemisphere, September 2002: Dynamical evolution // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 590–602. DOI: 10.1175/JAS-3318.1.

Eswaraiah S., Kim J.-H., Lee W., Hwang J., Kumar K.N., Kim Y.H. Unusual changes in the Antarctic middle atmosphere during the 2019 warming in the Southern Hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 19. P. e2020GL089199. DOI: 10.1029/2020GL089199.

Feng W., Chipperfield M.P., Roscoe H.K., Remedios J.J., Waeterfall A.M., Stiller G.P., Glatthor N., Höpfner M., Wang D.-Y. Three-dimensional model study of the Antarctic ozone hole in

2002 and comparison with 2000 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 822–837. DOI: 10.1175/JAS-3335.1.

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate.* 2017. V. 30. № 14. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

Goncharenko L.P., Harvey V.L., Greer K.R., Zhang S.-R., Coster A.J. Longitudinally dependent low-latitude ionospheric disturbances linked to the Antarctic sudden stratospheric warming of September 2019 // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 8. P. e2020JA028199. DOI: 10.1029/2020JA028199.

Grooß J.-U., Konopka P., Müller R. Ozone chemistry during the 2002 Antarctic vortex split // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 860–870. DOI: 10.1175/JAS-3330.1.

Grytsai A.V., Evtushevsky O.M., Milinevsky G.P. Anomalous quasi-stationary planetary waves over the Antarctic region in 1988 and 2002 // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. № 5. P. 1101–1108. DOI: 10.5194/angeo-26-1101-2008.

- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- Hirota I., Kuroi K., Shiotani M.* Midwinter warmings in the southern hemisphere stratosphere in 1988 // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 1990. V. 116. № 494. P. 929–941. DOI: 10.1002/qj.49711649407.
- Hoppel K., Bevilacqua R., Allen D., Nedoluha G., Randall C.* POAM III observations of the anomalous 2002 Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 7. P. 1394. DOI: 10.1029/2003GL016899.
- Klekociuk A.R., Tully M.B., Krummel P.B., Henderson S.I., Smale D., Querel R., Nichol S., Alexander S.P., Fraser P.J., Nedoluha G.* The Antarctic ozone hole during 2018 and 2019 // *J. South. Hemisph. Earth Syst. Sci.* 2021. V. 71. № 1. P. 66–91. DOI: 10.1071/ES20010.
- Kogure M., Yue J., Liu H.* Gravity wave weakening during the 2019 Antarctic stratospheric sudden warming // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. № 8. P. e2021GL092537. DOI: 10.1029/2021GL092537.
- Kuttippurath J., Nikulin G.* A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. № 17. P. 8115–8129. DOI: 10.5194/acp-12-8115-2012.
- Lim E.-P., Hendon H.H., Butler A.H., Thompson D.W.J., Lawrence Z.D., Scaife A.A., Shepherd T.G., Polichtchouk I., Nakamura H., Kobayashi C., Comer R., Coy L., Dowdy A., Garreaud R.D., Newman P.A., Wang G.* The 2019 Southern Hemisphere stratospheric polar vortex weakening and its impacts // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2021. V. 102. № 6. P. E1150–E1171. DOI: 10.1175/BAMS-D-20-0112.1.
- Manney G.L., Sabutis J.L., Allen D.R., Lahoz W.A., Scaife A.A., Randall C.E., Pawson S., Naujokat B., Swinbank R.* Simulations of dynamics and transport during the September 2002 Antarctic major warming // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 690–707. DOI: 10.1175/JAS-3313.1.
- Manney G.L., Millán L.F., Santee M.L., Wargan K., Lambert A., Neu J.L., Werner F., Lawrence Z.D., Schwartz M.J., Livesey N.J., Read W.G.* Signatures of anomalous transport in the 2019/2020 Arctic stratospheric polar vortex // *J. Geophys. Res.* 2022. V. 127. № 20. P. e2022JD037407. DOI: 10.1029/2022JD037407.
- Milnevsky G., Evtushevsky O., Klekociuk A., Wang Y., Grytsai A., Shulga V., Ivaniha O.* Early indications of anomalous behaviour in the 2019 spring ozone hole over Antarctica // *Int. J. Remote Sens.* 2019. V. 41. № 19. P. 7530–7540. DOI: 10.1080/2150704X.2020.1763497.
- Newman P.A., Kawa S.R., Nash E.R.* On the size of the Antarctic ozone hole // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 21. P. L21104. DOI: 10.1029/2004GL020596.
- Newman P.A., Nash E.R.* The unusual Southern Hemisphere stratosphere winter of 2002 // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 614–628. DOI: 10.1175/JAS-3323.1.
- Noguchi S., Kuroda Y., Kodera K., Watanabe S.* Robust enhancement of tropical convective activity by the 2019 Antarctic sudden stratospheric warming // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 15. P. e2020GL088743. DOI: 10.1029/2020GL088743.
- Roy R., Kuttippurath J., Lefèvre F., Raj S., Kumar P.* The sudden stratospheric warming and chemical ozone loss in the Antarctic winter 2019: comparison with the winters of 1988 and 2002 // *Theor. Appl. Climatol.* 2022. V. 149. P. 119–130. DOI: 10.1007/s00704-022-04031-6.
- Safieddine S., Bouillon M., Paracho A.-C., Jumelet J., Tencé F., Pazmino A., Goutail F., Wespes C., Bekki S., Boynard A., Hadji-Lazaro J., Coheur P.-F., Hurtmans D., Clerbaux C.* Antarctic ozone enhancement during the 2019 sudden stratospheric warming event // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 14. P. e2020GL087810. DOI: 10.1029/2020GL087810.
- Shen X., Wang L., Osprey S., Hardiman S.C., Scaife A.A., Ma J.* The life cycle and variability of Antarctic weak polar vortex events // *J. Climate.* 2022. V. 35. № 6. P. 2075–2092. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0500.1.
- Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316. DOI: 10.1029/1999RG900008.
- Stolarski R.S., McPeters R.D., Newman P.A.* The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 62. № 3. P. 716–720. DOI: 10.1175/JAS-3338.1.
- Wargan K., Weir B., Manney G.L., Cohn S.E., Livesey N.J.* The anomalous 2019 Antarctic ozone hole in the GEOS constituent data assimilation system with MLS observations // *J. Geophys. Res.* 2020. V. 125. № 18. P. e2020JD033335. DOI: 10.1029/2020JD033335.
- Waugh D.W., Polvani L.M.* Stratospheric polar vortices. In: Polvani L.M., Sobel A.H., Waugh D.W. (Eds.). *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry* // *Geophysical Monograph Series.* 2010. V. 190. P. 43–57. DOI: 10.1002/9781118666630.ch3.
- Waugh D.W., Sobel A.H., Polvani L.M.* What is the polar vortex and how does it influence weather? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2017. V. 98. № 1. P. 37–44. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00212.1.
- Zuev V.V., Savelieva E.S.* Dynamic characteristics of the stratospheric polar vortices // *Dokl. Earth Sci.* 2024. V. 517. № 1. P. 1240–1248. DOI: 10.1134/S1028334X24601895.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВОЗДЕЙСТВИЕ КРУПНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ (АПРЕЛЬ 2023 г., КАМЧАТКА) НА ЭКОСИСТЕМЫ: МАСШТАБЫ ПОГРЕБЕНИЯ И ПОРАЖЕНИЯ ЛЕСОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2025 г. С. Ю. Гришин¹, *

¹Федеральный научный центр биоразнообразия ДВО РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: grishin@biosoil.ru

Поступила в редакцию 31.07.2024 г.

В ходе сильного извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. произошел обвал активного купола, сошли пирокластические потоки и прошел масштабный пеплопад. По спутниковым изображениям с ИСЗ Sentinel-2 определены масштабы погребения территории высокотемпературными отложениями — ~60 км², а также оценено разнообразие погребенных и погибших экосистем. Пирокластические отложения обвала перекрыли юго-восточный сектор вулкана на площади более 50 км² в высотном интервале ~2000–500 м н.у.м. Ниже этой территории, русла и долины рек до высоты ~150 м заполнили узкие языки пирокластических потоков. Отложения языков заняли площадь 12 км²; нижняя граница одного из них находится на расстоянии 22 км от эруптивного центра. Лесная и стланиковая растительность была уничтожена на площади ~24 км², причем в основном погребена (до 85% площади), а также погибла из-за захлестывания деревьев шлейфами пирокластических потоков и воздействия пирокластических волн. В зоне схода пирокластических потоков уничтоженные леса образованы главным образом березой *Betula ermanii* и лиственницей *Larix sibirica*, а также зарослями ольхового стланика *Alnus fruticosa*. Слой пепла толщиной более 1 см перекрыл территорию центральной Камчатки площадью более 10000 км². В лесном поясе на склонах вулкана Шивелуч отложился пепел толщиной 6–10 см, древесные растения в основном уцелели. Постэруптивные явления в виде вторичного переноса пепла и переотложения размывтой водотоками пирокластики будут протекать многолетний период и повлекут образование новых зон повреждения и поражения растительности.

Ключевые слова: вулканизм, извержение, динамика среды, лесная растительность, пирокластические потоки, пирокластические волны, Камчатка

DOI: 10.31857/S0205961425010023, EDN: DHSCQA

ВВЕДЕНИЕ

10–13 апреля 2023 г. произошло пароксизмальное извержение вулкана Шивелуч (центральная Камчатка). По первым сообщениям очевидцев, в результате интенсивного пеплопада в пос. Ключи (45 км к югу от вулкана) выпал слой пепла мощностью до 8 см (Гришин и др., 2024). В дальнейшем было обнаружено, что извержение сопровождалось сходом пирокластических потоков, отложения которых перекрыли обширную территорию. После появления спутниковых изображений стало очевидно, что воздействие извержения на окружающую среду особо масштабно, а само оно является крупнейшим вулканическим событием последних десятилетий на Камчатке. Были опубликованы первые данные по параметрам пеплопада и воздействию его на окружающую среду (Гирина и др., 2023; Гришин и др., 2024). В данной работе по спутниковым изображениям с ИСЗ Sentinel-2 определена площадь отложе-

ний пирокластических потоков, а также выявлен масштаб воздействия извержения на природу района, включая погребение и поражение лесов, дана оценка разнообразия уничтоженной растительности. Помимо анализа спутниковых данных, использованы материалы кратких полевых исследований, проведенных в данном районе в августе 2023 г., и ранее, в 1996 г. и 2012 г. (Гришин и др., 2000, 2015).

СОВРЕМЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ

Вулкан Шивелуч (высота — 3283 м) — самый северный, один из крупнейших и наиболее активных вулканов Камчатки. Извергаемые продукты — андезиты, что определяет взрывной характер извержений с масштабными разрушительными последствиями. За последние столетия особо мощные извержения происходили в ~1430, ~1650, 1854 и 1964 гг. (Меле-

кесцев и др., 1991; Ponomareva et al., 2015). В результате катастрофического извержения 1964 г. на южном склоне вулкана образовалась вулканическая пустыня (рис. 1) площадью около 100 км² (Горшков, Дубик, 1969; Белоусов, Белоусова, 1995). Начиная с 1980 г., в кратере вулкана рос крупный активный купол. Периодические умеренные извержения (в 1993, 2001, 2004 гг. и др.) сопровождались обрушениями частей купола, пеплопадами, сходом раскаленных лавин и пирокластических потоков. Из-за особенностей морфологии вулкана, основные направления схода обвалов, раскаленных лавин, пирокластических потоков и волн ориентированы в направлении южных склонов Шивелуча. Значительная часть вулкаников устремляется по долине р. Байдарная в юго-западном секторе вулкана, а также р. Кабеку в юго-восточном секторе. Крупные извержения со сходом пирокластических потоков (рис. 1) произошли в 2005 и 2010 г. (Жаринов, Демянчук, 2013). Пирокластические потоки представляют собой смесь раскаленного (>500°C) обломочного материала и газа; потоки скатываются с большой скоростью по понижениям на склонах вулкана, погребая своими отложениями русла и долины. Потоки сопровождают пирокластические волны – газонасыщенные турбулентные вихри с песчаным материалом. Скорость волн составляет десятки метров в секунду, температура – несколько сотен градусов.



Рис. 1. Массив вулкана Шивелуч. Территории, открытые отложениями крупных недавних извержений (числа соответствуют году извержений). 1 – вершина Старый Шивелуч (высота 3283 м); 2 – активный купол. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 01.07.2023.

СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ДО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2023 г.

Растительность района распределена на разнородных по генезису и возрасту отложениях. Для территории воздействия извержения 2023 г. характерны два основных природных комплекса. Первый комплекс располагался выше 500 м н.у.м. и до апреля 2023 г. представлял собой вулканическую пустыню с крайне разреженным растительным покровом (Гришин и др., 2000). Эта часть зоны поражения сформирована отложениями извержения 1964 г. и расположенными восточнее отложениями извержения 2010 г. (рис. 1; 2а). Первые были обвальными, холодными с момента извержения; вторые – обвальными / пирокластическими горячими (локально горячими, судя по протаиванию снежного покрова, они оставались вплоть до апреля 2023 г.). Второй комплекс располагался ниже 500 м; здесь преобладала лесная, а также частично луговая и стланиковая растительность на старых (возраст около 600 лет) отложениях предыдущих вулканических катастроф. В высотном интервале 200–460 м н.у.м. лесная растительность из березы каменной *Betula ermanii* и лиственницы *Larix cajanderi* расположена на холмистых отложениях гигантского обвала, произошедшего в ходе катастрофического извержения в позднем плейстоцене (Ponomareva et al., 2015). По верхним частям склонов холмов доминируют заросли ольхового стланика *Alnus fruticosa*. Ниже 300 м преобладают леса из лиственницы, часто с участием березы каменной и других видов лиственных деревьев (рис. 2а). Массив еловых (*Picea jezoensis*) лесов расположен на юго-западных подножиях Шивелуча, а в юго-восточном секторе вулкана ельники встречаются лишь местами и, как правило, разреженно.

МАСШТАБЫ ОТЛОЖЕНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

В ходе извержения, помимо интенсивного пеплопада, произошел обвал активного купола. Материалы, слагавшие купол, обрушились раскаленной лавиной к югу от купола, а затем прошли и отложились на юго-восточном склоне вулкана (рис. 1; 2б). Высотный диапазон прохождения продуктов извержения от купола до нижней точки отложений составил около 2000 м по вертикали, а максимальная протяженность – около 22 км. При этом можно условно выделить 3 зоны (рис. 2б), которые назовем зонами транзита (зона I), аккумуляции (II) и дальнего прохождения пирокластических потоков (III).

Зона транзита протянулась на 7–8 км к югу от активного купола. Верхняя ее половина проходит до высоты ~1300 м н.у.м. по безжизненному склону, пе-

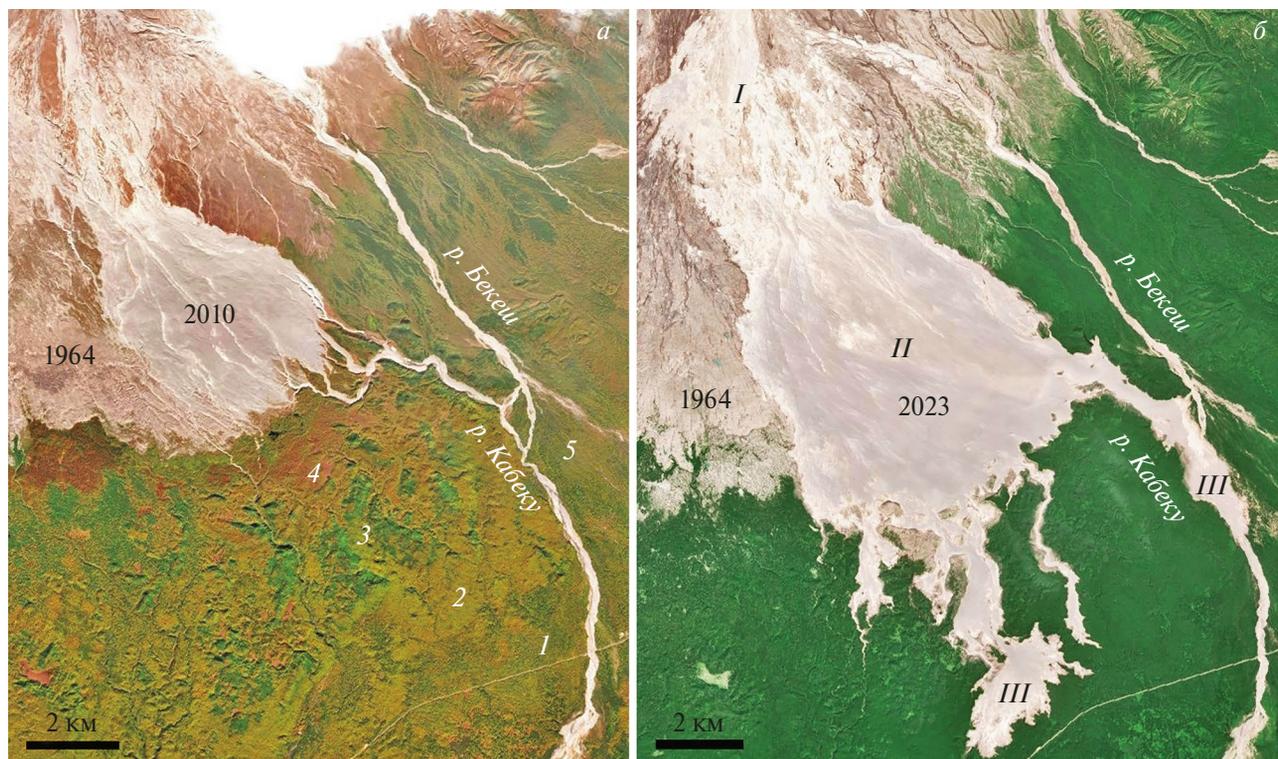


Рис. 2. Юго-восточный склон вулкана Шивелуч: *а* – состояние до извержения 2023 г. Цифры показывают преобладающую растительность: 1 – леса из лиственницы, 2 – леса из березы каменной, 3 – заросли ольховника, 4 – комплекс из лугов, стлаников и лесов, 5 – смешанные долинские леса и стланики. На территориях перекрытых вулканическими отложениями указан год извержения. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 24.09.2022; *б* – отложения извержения 2023 г., зоны отложений: I – зона транзита, II – зона масштабной аккумуляции пирокластических отложений, III – зона дальнего прохождения пирокластических потоков. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 01.07.2023.

рекрытому вулканическими отложениями предыдущих извержений, многократно отложенными за последние десятилетия. В интервале 1300–800 м н.у.м. происходит поворот на юго-юго-восток, а на склоне участками, полосами и грядами появляются участки свежих отложений. К нижней границе зоны I этих участков становится больше, они смыкаются местами, покрывая до 70–80% территории. Площадь видимых отложений 2023 г. в зоне I, согласно изображению от 29.04.2023 г. – около 10.5 км².

Зона аккумуляции представляет собой поле площадью ~38 км², сплошь покрытое отложениями. Отложения лежат на юго-восточном склоне, в высотном интервале от 800 м до 400–500 м н.у.м. Поле протянулось сверху вниз почти на 8 км, расширяясь в форме колокола, и имеет внизу ширину ~7 км. В нижней части зоны II отложениями были полностью перекрыты долины р. Кабеку и трех ее притоков, при этом третий приток имел почти V-образный врез глубиной более 50 м (Гришин и др., 2015). Отложения 2023 г. перекрыли отложения предыдущего извержения (октябрь 2010 г.), которые в наиболее мощных толщах были горячими вплоть до извержения 2023 г., судя по протаиванию снега на площади ~2 км².

Ниже зоны II пирокластические потоки сошли по руслам и долинам, в результате четко выделяются пять рукавов потоков, образовавших зону III (рис. 2б). Восточный рукав прошел 4.5 км по долине р. Кабеку, спустившись до 220 м н.у.м. Ширина полосы его высокотемпературных отложений достигла 1 км. Наиболее крупный по площади центральный рукав спустился по старому, заросшему лесом руслу до 145 м н.у.м., пройдя около 6 км. В конечной части его шлейф растекался крупным веером по лесу (в основном из лиственницы), перекрыв участок шириной около 3 км, и лишь 400–500 м не дошел до региональной автотрассы (рис. 2б; 4б). Общая площадь отложений всех рукавов пирокластических потоков составила ~12.5 км².

ТЕМПЕРАТУРА И ТОЛЩИНА ОТЛОЖЕНИЙ

Температура материала пирокластических потоков во время их отложения превышает 500°C. В мощных (десятки метров) толщах температура может оставаться очень высокой в течение нескольких лет и даже десятилетий, а на поверхности она быстро снижается, особенно в холодное время

года. Полевые измерения в августе 2023 г. в зонах II и III показали, что температура отложений на глубине 50 см достигала 50–65°C. Во многих местах, где по условиям рельефа сформировались мощные толщи отложений, были встречены парящие фумаролы с температурой пара на выходе 200–300°. Выявлено, что серии и цепочки фумарол были приурочены к погребенным руслам.

В зоне I к весне 2024 г. перестал стаивать снег, покрывающий большую часть отложений. Это означало остывание отложений и, соответственно, их относительно небольшую толщину. Лишь малая часть отложений, выраженная цепочкой островков в осевой части зоны, оставалась без снега, то есть горячей.

На большей части зон II и III отложения остались горячими в течение первого года после извержения, судя по стаиванию снежного покрова весной 2024 г. Сильные морозы зимой 2023/2024 г. привели к тому, что большая часть поверхности остыла; снег в таких условиях протаивал лишь на участках глубоких врезов в V-образных долинах, где толщина отложений достигала 50 м (рис. 3а). Когда морозы к весне 2024 г. ослабли, протаивание снега возобновилось на большей части территории зоны II (рис. 3а). Таким образом, многометровые

толщи отложений, которые перекрыли пологие склоны в зоне II, не остыли и в течение длинной морозной (в горных условиях) зимы. Однако в связи с различной мощностью отложений произошла дифференциация интенсивности протаивания. Крупные участки, покрытые нестайвающим снегом, показывают наличие маломощных отложений внутри контура зоны II. Их общая площадь около 8–12 км², а толщина отложений, предположительно – 1–5 м. На спутниковых изображениях марта 2024 г. видно, что основная часть территории зоны II остается нагретой. Заметно проявилась структура прохождения и отложения материала: видно, что субпараллельные полосы более горячих отложений (голый субстрат) чередуются с полосами остывшей поверхности, покрытыми снегом.

В зоне III снег сначала протаял на поверхности отложений большей части самых крупных потоков (“центральный” и в долине р. Кабеку). Протаивание на остальных пирокластических потоках отсутствовало или было представлено фрагментами, т.е. их отложения оказались маломощными.

Таким образом, по протаиванию снежного покрова можно судить о температуре и, соответственно, о мощности отложений, а также условно выделить зоны разной мощности: предположительно

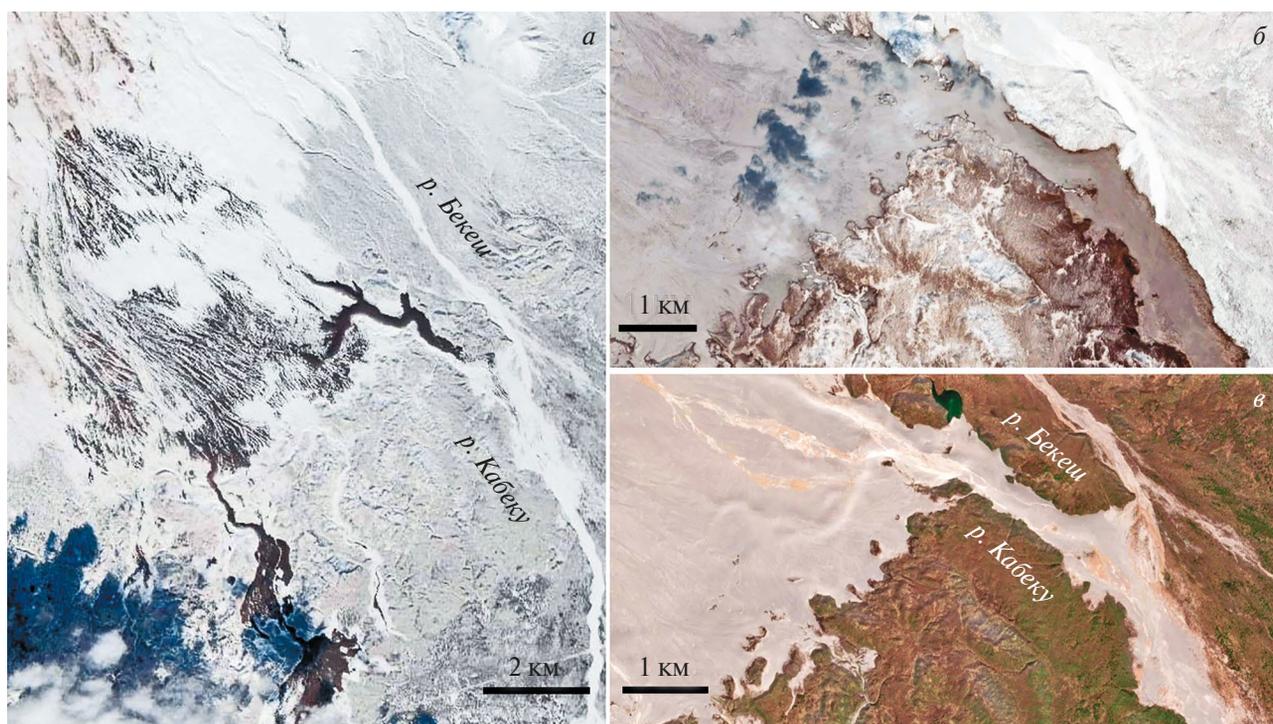


Рис. 3. Трансформация поверхности пирокластических отложений: *а* – протаивание снежного покрова на горячих пирокластических отложениях извержения 2023 г. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 24.03.2024; *б* – юго-восточная часть зоны II, долины р. Кабеку и ее притоков погребены. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 29.04.2023; *в* – тот же участок 13 месяцев спустя: отложения на участках погребенных долин притоков просели; свежие наносы обозначили новые русла; сформировано подпрудное озеро (вверху, посередине). Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 05.06.2024.

30–50 м, 10–25 м и до 5 м. В результате, можно предварительно оценить общий объем пирокластических отложений в зонах I–III величиной 0.4–0.5 км³.

Изменение рельефа вызвало локальное подпруживание одного из водотоков, путь которому преградили пирокластические отложения. В результате образовалось озеро, которое к началу лета 2024 г. достигло 700 м в поперечнике и площади около 0.08 км² (рис. 3в).

ПОГРЕБЕНИЕ ЛЕСНОЙ И СТЛАНИКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Извергнутые пирокластические отложения продвинули вниз границу между вулканической пустыней и лесом (рис. 2). Смещение этой границы составило ~1–2.2 км, снижение по вертикали от высоты 490–540 м до 400–500 м н.у.м. Новая граница между вулканической пустыней и ниже расположенными склонами с уцелевшим лесом оказалась резкой; выше границы и близко к ней расположено более десятка островков леса, размером ~50–500 м в поперечнике (рис. 2б; 4а). Они являются верхними частями холмов, основания которых были погребены отложениями движущихся пирокластических потоков. Между прежней и новой границами образовался контур длиной ~7 км по фронту и общей площадью ~11 км², где была полностью погребена лесная, луговая и стланиковая растительность. Помимо сомкнутой растительности лесного пояса, пирокластические отложения 2023 г. погребли крайне разреженный растительный покров на отложениях

1964 г. (к западу от зоны II) и лугово-стланиковую растительность (к востоку от зоны II).

Ниже зоны II лесная растительность была погребена отложениями пяти языков пирокластических потоков. Мощность отложений составила до нескольких десятков метров в глубоко врезанных руслах самых крупных языков (на высоте 390–450 м н.у.м.). В основном оказались погребенными леса из березы каменной и лиственницы, а также заросли стлаников, преимущественно ольховника. Как правило, вдоль погребенных русел, по осевой части языков, отмечены сплошные отложения, без погибших деревьев или валежа сломанных стволов. Эти полосы отложений имеют мощную толщу пирокластики, которая оставалась горячей и год спустя после извержения. В нижней половине языков мощные толщи отложений окружены каймой полупогребенного леса (рис. 4б). Толщина отложений в этой кайме составляет, по-видимому, до десятка метров; по удалению от мощных толщ к живому лесу она постепенно, на протяжении 200–400 м, выклинивается. Древостой разрежен, подлесок погребен, стволы деревьев частью погребены, а большей частью переломаны или перегорели у погребенного в раскаленных отложениях комля и лежат на поверхности. Отложения в этих периферийных зонах через 4 месяца после извержения были горячими и полупогребенная древесина местами тлела. Локально встречены и стоящие мертвые деревья; из-за умеренного динамического воздействия на основание стволов они устояли. Общая площадь полупогребенных и погибших таким образом древостоев составляет ~2.5 км².



Рис. 4. Гибель и погребение древостоев: а – изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 01.07.2023; б – изображение с ИСЗ GeoEye-1 от 29.04.2023. 1 – зоны мощных отложений пирокластических потоков, которые полностью погребли леса; 2 – участки разрушенного и полупогребенного леса; 3 – участки гибели леса под воздействием пирокластических волн; 4 – лес до начала вегетации, со снежным покровом под пологом древостоя.

ПОРАЖЕНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В конечных частях (шлейфах) пирокластических потоков, которые широкими веерами растекались по лесу, толщина отложений уменьшается до 1 метра и менее; поэтому они быстро остыли. Деревья не были снесены и погребены, а остались стоять. Отложения обожгли основания стволов в местах контакта, а также термически воздействовали на кроны (вплоть до опаливания; отдельные деревья выгорели). В результате большинство деревьев погибло; образовались полосы и участки погибших древостоев.

Помимо этого, пирокластические волны, которые сопровождали пирокластические потоки, оставили свой след в виде полос мертвых деревьев по бортам долин в горном рельефе. Высокотемпературные газово-песчаные вихри опалили и частично разрушили древостой, приводя его к гибели в полосах шириной до ~50–100 м, примыкающих к зонам отложений потоков (так же, как это произошло в 2005 г. в долине р. Байдарной и в долине р. Кабеку в 2010 г. (Гришин, 2009; Гришин и др., 2015)).

Участки древостоя, погибшего от воздействия пирокластических волн и маломощных шлейфов пирокластических потоков, расположены в основном выше 200 м н.у.м.; они состоят преимущественно из березы каменной. В то же время леса из лиственницы, расположенные ниже 200–220 м, были разрушены (деревья сломаны, обгорели и вывалены) или погибли (без существенных внешних повреждений) под воздействием частичного погребения более мощными отложениями пирокластических потоков.

Начало вегетации (снимок от 26.06.2023) показало масштабы гибели древостоев от прохождения маломощных шлейфов пирокластических потоков и пирокластических волн – около 3.5 км². Самый крупный участок погибшего древостоя площадью ~0.8 км² расположен в западной части полосы контакта отложений зоны II и леса (рис. 2б; 4а). Горные леса из березы каменной там погибли на участке шириной до 1500 м и глубиной до 700 м. В островках леса, расположенных возле нижней границы зоны II, деревья и стланики также в основном погибли. У ряда островков видно, что в их северной (верхней) половине древесная растительность полностью погибла от воздействия пирокластических волн, а в южной – частично уцелела, защищенная рельефом.

В целом, лесная и стланиковая растительность, включая хвойные леса, была погребена и погибла на площади около 24 км². По предварительной оценке, уничтоженные леса состояли на ~50% из березы каменной, 25% – из лиственницы (включая

местами встречающуюся ель), около 15% – смешанные леса и леса из лиственных пород, и около 10% – из зарослей ольхового стланика.

ПЕПЛОПАД

Пеплопад охватил широкий сектор юго-западного подножья вулкана, а также территории, расположенные от вулкана к западу (до Срединного хребта; расстояние около 90–100 км), юго-западу (долина р. Камчатки, около 130 км) и югу/юго-западу (северная половина Ключевской группы вулканов). Изучение спутниковых снимков показало, что после начала вегетации 2023 г. светлый подсохший пепел был замечен только на участках обнаженных грунтов. Всего удалось выявить более 10 типов естественных и антропогенных ландшафтов, где на спутниковых изображениях зафиксировано присутствие скоплений пепла. По этим отметкам удалось очертить территорию распространения отложений пеплопада, имеющих толщину более 1 см, площадью около 10000 км² (Гришин и др., 2024). Допустив, в соответствии с результатами наших полевых измерений, среднюю толщину слоя слежавшихся отложений 2.5 см, получим объём пепла на этой территории около 0.25 км³. Это большая величина даже без учёта тейфры дальнего разноса (которая отложилась слоем толщиной менее 1 см). Пеплопад 11 апреля 2023 г. по объёму извергнутых продуктов стал самым крупным пеплопадом вулкана за последние почти 60 лет и крупнейшим в России за последние 40 лет. Негативное воздействие умеренного пеплопада на растительность лесного пояса (мощность свежих отложений 6–10 см) было минимизировано благодаря ряду обстоятельств (тонкий пепел, отсутствие облиствения, снежный покров, на который лег слой пепла).

ПОСТЭРУПТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В бесснежный период 2023 г. свежие вулканические отложения начали размываться и переноситься водотоками. Начало этого процесса зафиксировано на изображении с ИСЗ WorldView-3 от 20.05.2023: поток р. Бекеш, впадающей в р. Кабеку, размывает отложения пирокластического потока. Вслед за ним начался размыв отложений в верховьях р. Кабеку и ее притоков, долины которых были погребены отложениями 2023 г. На поверхности свежих и горячих отложений начали формироваться новые русла; на изображении с ИСЗ Sentinel-2 от 05.06.2024 видны 6 русел, пересекающих зону II сверху вниз и уходящих ниже, в зону III (часть из них видна на рис. 3в). Вынесенные по этим руслам пирокластические отложения переотложены ниже по течению и замыкают участки леса, что приводит

к усыханию и гибели древостоев. Так, стал формироваться крупный участок замыкания леса по левобережью р. Кабеку; к 17.6.2024 г. его площадь составила около 2 км² (рис. 5а, б).

На обширных открытых пространствах выше новой границы леса свежесотложенные рыхлые материалы будут подвергаться эрозии, а их поверхность в ветреную погоду пылить. Этот процесс активно шел в бесснежный период 2023 г., особенно когда ветер становился сильным (более 20 м/с, по данным метеостанции в пос. Ключи). В результате тысячи тонн пыли, поднятой в воздух, перемещались не только в вулканической пустыне, но и уносились за десятки километров от вулкана, достигая Тихого океана (рис. 5в). Эти процессы усугублены значительным объемом

тефры, выпавшей в ходе масштабного пеплопада 11 апреля 2023 г., и могут продолжаться много лет.

ОБСУЖДЕНИЕ

Извержение 2023 г. в значительной мере повторило эруптивное событие октября 2010 г., когда в результате обвала купола раскаленные массы легли на юго-восточном склоне; ниже обширной зоны аккумуляции сошли пирокластические потоки; пеплопад прошел в южных секторах вулкана и удаленных окрестностях (десятки километров от центра извержения). Однако масштабы извержения 2023 г. заметно крупнее, площадь горячих отложений существенно больше. При этом высоко-

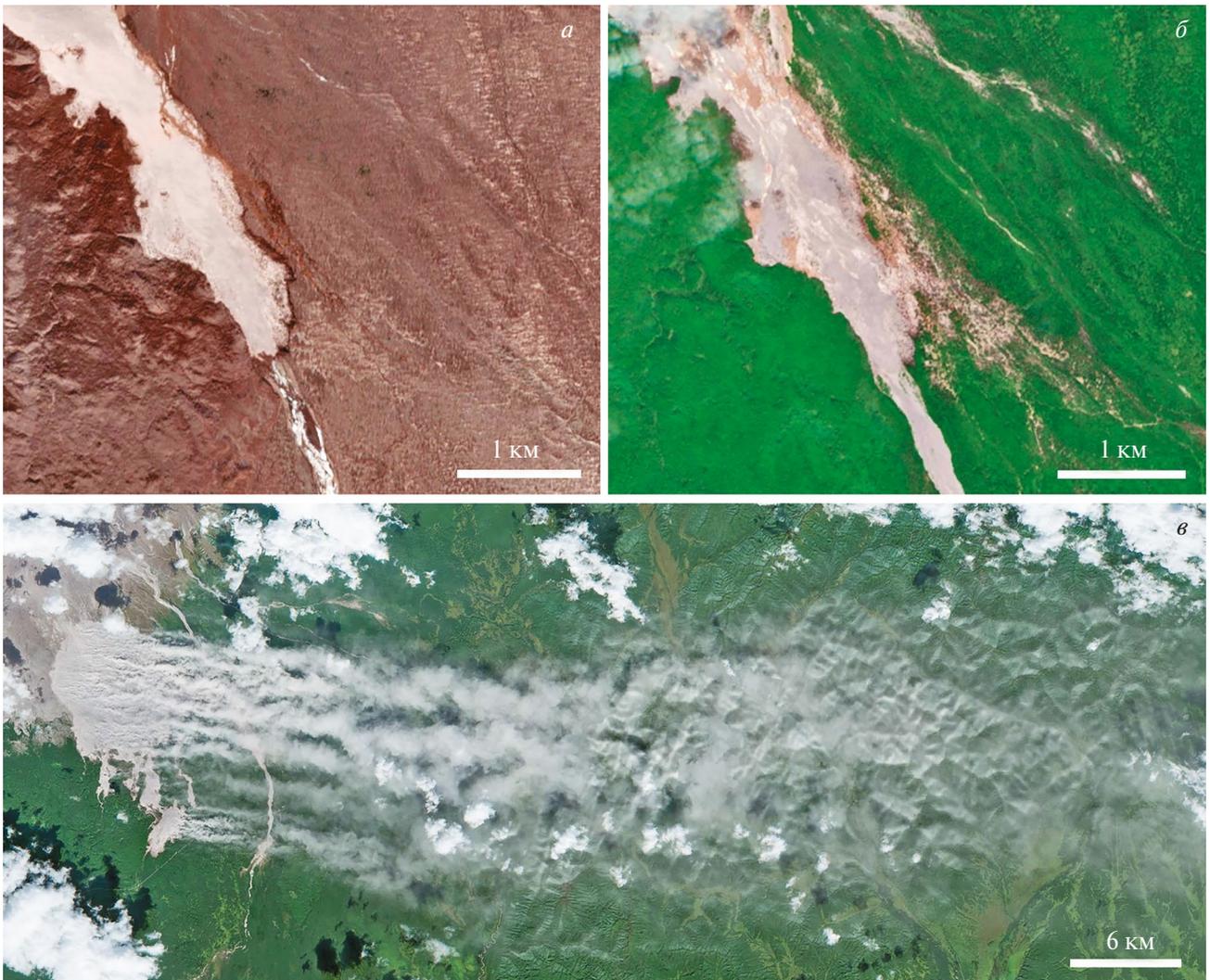


Рис. 5. Постэруптивные явления: *а* – язык пирокластического потока в долине р. Кабеку до начала его размывания. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 17.05.2023; *б* – замыкание территории по левому берегу р. Кабеку переотложенными пирокластическими отложениями. Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 17.06.2024; *в* – перенос пепла и тонких пирокластических отложений сильным ветром с поверхности поля отложений извержения 2023 г. (в левой части). Изображение с ИСЗ Sentinel-2 от 04.09.2023.

температурные отложения 2023 г. перекрыли еще не остывшие, горячие в мощных толщах, отложения 2010 г.

Пирокластические потоки 2023 г. прошли значительно дальше и ниже — до 22 км от купола вулкана (в 2010 г. — до 18 км); это максимальное расстояние для современных извержений на Камчатке и Курилах. Существенно, что при этом не образовались лахары (вулканогенные сели), несмотря на то, что извержение произошло в период максимума снегонакопления. Это можно объяснить особой мощностью и температурой пирокластических отложений, потоки которых, стремительно двигаясь, перекрывали снежный покров и мгновенно испаряли его в своей многометровой раскаленной толще.

Площадь погребения лесной и стланиковой растительности в результате извержения 2023 г. существенно (на порядок, по нашим данным) превысила площадь лесов, погребенных в ходе извержения 2010 г. Первоначально (в апреле–июне 2023 г.) были не ясны масштабы поражения леса маломощными шлейфами пирокластических потоков и пирокластическими волнами, которые проходили по лесу и опаливали деревья, приводя их к гибели. С началом вегетации 2023 г. по полосам мертвого древостоя удалось определить зоны поражения и оценить их площадь (около 3.5 км²).

В целом, извержение 2023 г. существенно увеличило площадь огромного (более 150 км²) вулканогенного бедленда, расположенного на южном, юго-западном и юго-восточном склонах вулкана Шивелуч. Негативное воздействие огромного объема отложений на природу смежных районов будет продолжаться в течение ряда последующих лет и десятилетий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сильного извержения на территории воздействия произошла радикальная смена природной среды с масштабным погребением и разрушением экосистем. Высокотемпературные отложения апрельского извержения 2023 г. многометровым чехлом площадью ~60 км² легли на склоны вулкана, заметно снизив верхнюю границу леса в его юго-восточном секторе. Пирокластические потоки прошли рекордно дальше для современных извержений Камчатки расстояние — до 22 км от эруптивного центра. Удар по экосистемам юго-восточного сектора вулкана является локальной экологической катастрофой. На площади около 24 км² была погребена и погибла лесная и стланиковая растительность, включая хвойные леса.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, тема № 121031000134-6.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарю вулканологов М.Г. Белоусову и А.Б. Белоусова (ИВиС ДВО РАН), которые просмотрели статью и сделали конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.* Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предварающееся крупномасштабным обрушением постройки. Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 116–126.
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283–291.
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч / Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
- Гришин С.Ю.* Гибель леса на вулкане Шивелуч под воздействием палящей пирокластической волны (Камчатка, 2005 г.) // Экология. 2009. № 2. С. 158–160.
- Гришин С.Ю., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. и др.* Воздействие пеплопада извержения вулкана Шивелуч (Камчатка, 11 апреля 2023 г.) на лесную растительность // Биота и среда природных территорий. 2024. Т. 12. № 1. С. 39–55.
- Гришин С.Ю., Бурдуковский М.Л., Лазарев А.Г. и др.* Гибель растительности в результате прохождения пирокластической волны (вулкан Шивелуч, Камчатка, 2010 г.) // Вестник ДВО РАН. 2015. № 2. С. 101–108.
- Гришин С.Ю., Крестов П.В., Верхолат В.П. и др.* Восстановление растительности на вулкане Шивелуч после катастрофы 1964 г. // Комаровские чтения. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 46. С. 73–104.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В.* Крупные эксплозивные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с частичным разрушением экструзивного купола 28 февраля 2005 г. и 27 октября 2010 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 48–62.
- Мелекесцев И.В., Волинец О.Н., Ермаков В.А. и др.* Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. 1991. Т. 1. С. 84–103.
- Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al.* Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // International Journal of Earth Sciences. 2015. V. 104. P. 1459–1482.

Impact of a Major Eruption of the Shiveluch Volcano (April 2023, Kamchatka) on Ecosystems: The Extent of Burial and Destruction of Forests According to Satellite Data

S. Yu. Grishin¹

¹*Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

During large-scale eruption of the Shiveluch volcano in April 2023, the active dome collapsed and intense ashfall occurred. Based on the Sentinel-2 satellite images, the scale of burial of the territory by volcanic deposits was determined – ~ 60 km², and the diversity of buried and dead ecosystems was also estimated. The high-temperature deposits of the collapse blocked the southeastern sector of the volcano over an area of more than 50 km² in the altitude range of ~ 2000-500 m a.s.l. Below, up to ~150 m, pyroclastic flows descended, the lower mark of one of the 5 tongues is located at a distance of 22 km from the eruptive center. Flow deposits occupied an area of 12 km². Forest and dwarf vegetation was destroyed in an area of ~24 km², and was mostly buried (up to 85% of the area), and also died due to the flooding of trees by plumes of pyroclastic flows and the impact of pyroclastic waves. In the zone of pyroclastic flows, the destroyed forests are formed mainly by stone birch and larch, as well as thickets of dwarf alder. An ash layer more than 1 cm thick covered an area of more than 10,000 km² in central Kamchatka. Ash 6–10 cm thick was deposited in the forest belt on the slopes of the Shiveluch volcano, woody plants mostly survived. Post-eruption phenomena in the form of secondary ash transfer and redeposition of pyroclastics washed out by watercourses will last for many years and will lead to the formation of new zones of damage and destruction of vegetation

Keywords: volcanism, eruption, environmental dynamics, forest vegetation, pyroclastic flows, Kamchatka

REFERENCES

- Belousov A.B., Belousova M.G.* Izverzhenie vulkana Shiveluch v 1964 g. (Kamchatka) – plinianskoe izverzhenie, predvayavsheesya krupnomasshtabnym obrusheniem postroyki [The 1964 eruption of Shiveluch (Kamchatka) – a plinian eruption preceded by a voluminous slide of the cone top] // *Volcanology and Seismology*. 1996. V. 17. P. 497–508. (In Russian).
- Girina O.A., Lupyay E.A., Horvat A., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Bri' A.A., Ozerov A.Yu., Kramareva L.S., Sorokin A.A.* Analiz razvitiya paroksizmal'nogo izverzheniya vulkana Shiveluch 10–13 aprelya 2023 goda na osnove dannyh razlichnyh sputnikovyyh sistem [Analysis of the development of the paroxysmal eruption of Sheveluch volcano on April 10–13, 2023, based on data from various satellite systems] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023. № 2. P. 283–291. (In Russian).
- Gorshkov G.S., Dubik Yu.M.* Napravlenyj vzryv na vulkane Shiveluch [Direct explosion on the Shiveluch volcano] / *Vulkany i izverzheniya*. Moscow: Nauka, 1969. P. 3–37. (In Russian).
- Grishin S.Yu.* Forest die-off under the impact of burning pyroclastic surge (Shiveluch volcano, Kamchatka, 2010) // *Russian Journal of Ecology*. 2009. № 2. P. 146–148.
- Grishin S.Yu., Belousov A.B., Belousova M.G., Perepelkina P.A.* Vozdeystvie peplopada izverzheniya vulkana Shiveluch (Kamchatka, 11 aprelya 2023 g.) na lesnyu rastitel'nost' [Impact of ash fallout of the 2023 eruption of Shiveluch volcano (Kamchatka) on the forest vegetation] // *Biota i sreda prirodnih territoriy*. 2024. № 1. P. 39–55. (In Russian).
- Grishin S.Yu., Burdukovskij M.L., Lazarev A.G., Komachkova I.V., Perepelkina P.A., Yakovleva A.N.* Gibel' rastitel'nosti v rezul'tate prohozhdeniya piroklasticheskoj volny (vulkan Shiveluch, Kamchatka, 2010 g.) [Devastation of vegetation as a result of an impact of pyroclastic surge (Shiveluch volcano, Kamchatka, 2010)] // *Vestnik DVO RAN*. 2015. № 2. P. 101–108. (In Russian).
- Grishin S.Yu., Krestov P.V., Verholat V.P., Yakubov V.V.* Vosstanovlenie rastitel'nosti na vulkane Shiveluch posle katastrofy 1964 g. [Restoration of vegetation on the Shiveluch volcano after the 1964 disaster] // *Komarovskie chteniya*. Vladivostok: Dal'nauka, 2000. № 46. P. 73–104. (In Russian).
- Zharinov N.A., Demyanchuk Yu.V.* Large explosive eruptions of Shiveluch volcano (Kamchatka) with partial destruction of the extrusive dome (February 28, 2005 and October 27, 2010) // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2013. T. 7. № 2. C. 131–144.
- Melekescev I.V., Volynec O.N., Ermakov V.A., Kirsanova T.P., Masurenkov Yu.P.* Vulkan Shiveluch [Shiveluch volcano] // *Deystvuyushchie vulkany Kamchatki*. 1991. Vol. 1. P. 84–103. (In Russian).
- Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle Ph., Derkachev A.* Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // *International Journal of Earth Sciences*. 2015. V. 104. P. 1459–1482.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДИНАМИКИ
МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АБРАЗИОННЫХ БЕРЕГОВ
КРИОЛИТОЗОНЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

© 2025 г. А. С. Викторов¹ *

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии
им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), Москва, Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024 г.

Статья посвящена изучению закономерностей динамики абразионных берегов криолитозоны на основе комплекса математического моделирования и космической съемки и их значения для получения информации о динамических параметрах идущих процессов по дистанционным данным. Ландшафт абразионных берегов с развитием термоцирков представляет собой сочетание термоцирков, ландшафт находится под действием процессов как появления новых термоцирков, так и частичного или полного стирания существующих термоцирков за счет формирования новых. Характерной особенностью термоцирков является четкая дугообразная граница с прилегающей водораздельной поверхностью, хорошо дешифрируемая на материалах космических съемок. Методика включала создание и анализ математической модели изменения морфологического строения абразионных берегов криолитозоны на основе подходов теории случайных процессов и эмпирические исследования размеров термоцирков в разных физико-географических условиях по материалам космических съемок. Комплекс математического моделирования и космических методов позволил показать, что в разных физико-географических и геокриологических условиях при значительном времени развития на однородных участках формируется устойчивое стационарное распределение размеров термоцирков абразионных берегов криолитозоны Арктики. Различия условий разных участков не влияют на факт существования предельного стационарного распределения. Таким образом, морфологическая структура абразионного берега, находясь в постоянном изменении, тем не менее, имеет стационарное распределение размеров термоцирков, их средний размер и среднюю плотность расположения, то есть находится в состоянии динамического равновесия. Получена зависимость предельного распределения размеров термоцирков абразионных берегов и распределения размеров формирующихся молодых термоцирков. Физико-географические, геолого-геоморфологические и геокриологические условия участков влияют на характер стационарного предельного распределения через распределение размеров формирующихся молодых термоцирков. Полученные результаты позволяют прогнозировать количественные характеристики процесса формирования термоцирков (и соответственно оползней), а именно, распределение размеров возникающих новых термоцирков и оползней, по измерениям по материалам однократной космической съемки высокого разрешения наблюдаемых размеров термоцирков; это существенно при прогнозе развития, в частности, отступления, берегов.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, абразионные берега, криолитозона, математические модели морфологических структур, данные дистанционного зондирования, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0205961425010039, **EDN:** DHTDJL

ВВЕДЕНИЕ

Многие исследования посвящены морфологическим особенностям абразионных берегов криолитозоны. Обширная группа работ посвящена исследованию идущих процессов в связи с отступанием берегов (Белова и др., 2001; Новикова, 2002; Пижанкова, Добрынина, 2010; Aleksyutina et al., 2018; Belova et al., 2020), ландшафтным факторам,

влияющим на развитие процессов (Совершаев, 1998; Хомутов, Лейбман, 2008; Кизяков, 2005; Васильев и др. 2001), их связи с климатическими характеристиками (Leibman et al., 2021). Однако большинство исследователей изучает процессы развития абразионных берегов криолитозоны в связи с отступанием, и соответственно выполняется анализ протяженности морфологических элементов (термоцирков) и ее изменения в направлении

перпендикулярном береговой линии. В то же время, мало внимания уделялось исследованию протяженности термоцирков вдоль берегового склона и ее количественным параметрам.

Целью исследования явилось изучение закономерностей динамики абразионных берегов криолитозоны на основе комплекса математического моделирования и космической съемки и их значения для получения информации об идущих процессах, включая их количественные параметры, по дистанционным данным.

Ландшафт абразионных берегов с развитием термоцирков представляет собой сочетание термоцирков, включающих в себя оползневые тела разного возраста, поверхности с развитием интенсивных термоабразионных, эрозионных,

обвальных-осыпных и термоденудационных процессов. Характерной особенностью термоцирков является четкая дугообразная граница с прилегающей водораздельной поверхностью, хорошо дешифрируемая на материалах космических съемок, возникновение такой границы связано с тем, что формирование термоцирка начинается, как правило, с развития оползневой поверхности. Нередко на склоне также наблюдаются дугообразные остаточные участки водораздельной поверхности, отвечающие различным стадиям оползания. Типичный вид берега представлен на рис. 1.

Исследование ориентировано на изучение изменения размеров термоцирков вдоль береговой линии, за размер термоцирка принималась длина хорды, замыкающей дугообразную границу термоцирка с прилегающей водораздельной поверхностью.

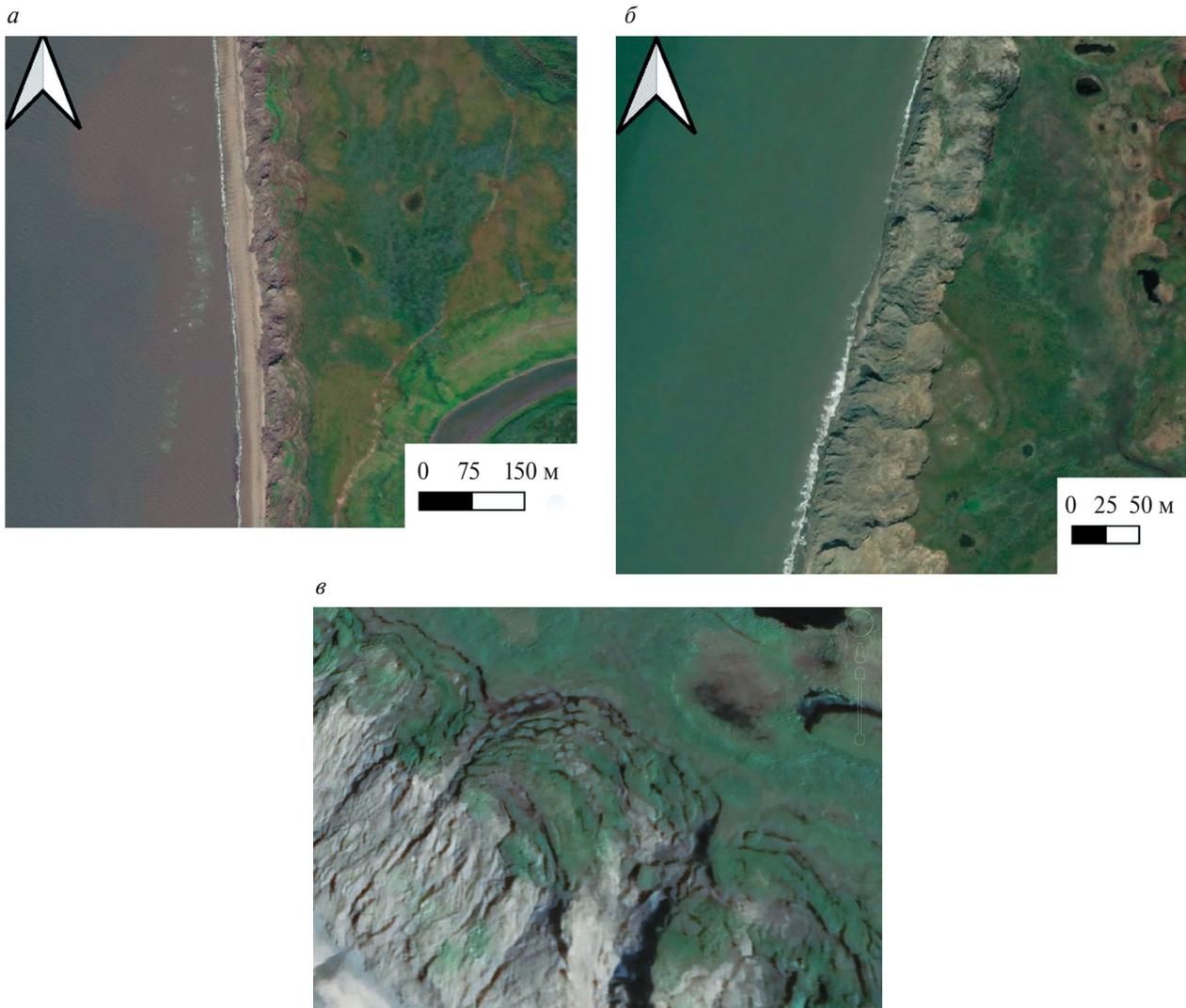


Рис. 1. Типичное изображение абразионных берегов с развитием термоцирков в криолитозоне на материалах космической съемки высокого разрешения видимого диапазона: а, б – общий вид (Викторов и др., 2023), в – пример термоцирка.

Развитие берегов происходит под действием комплекса процессов, участвующих в формировании значений размера термоцирка, включающего увеличение числа термоцирков за счет формирования нового термоцирка внутри границ существующего с разбиением более старого термоцирка на две части, уменьшение числа термоцирков за счет полного стирания термоцирков (и соответственно их хорд) при наложении более молодых, частичное стирание уже существующих термоцирков с сохранением их числа за счет наложения более молодых (“боковое стирание”), появление на том или ином участке нового формирующегося термоцирка.

В этом случае граница берегового склона и прилегающей водораздельной поверхности представляет собой систему дуг термоцирков, часть из которых является новыми, незатронутыми последующими стираниями, а другая часть является остаточными, сохранившимися после одно-, двух-, трех- и т.д. кратных частичных стираний существующих термоцирков новыми. Таким образом, в целом на снимке исследователь наблюдает в случайный момент времени (съемка) систему разновозрастных образований, находящуюся в постоянном изменении. В этой ситуации возникает задача – как соотносятся количественные характеристики наблюдаемого на космическом снимке изображения с количественными динамическими параметрами протекающего процесса формирова-

ния термоцирков, и соответственно какую информацию о процессе позволяет извлечь снимок.

МЕТОДИКА

Методика включала следующие этапы:

- создание и анализ математической модели изменения морфологического строения абразионных берегов криолитозоны,
- исследование размеров термоцирков в разных физико-географических условиях с использованием спутниковых данных.

Математическая модель изменения морфологического строения абразионных берегов криолитозоны базировалась на рассмотрении протекающих изменений как случайного процесса.

Исследование размеров термоцирков в разных физико-географических условиях с использованием спутниковых данных включало:

- выбор ключевых участков,
- измерение размеров термоцирков по материалам космической съемки,
- статистическую обработку полученных характеристик морфологического строения берегового склона и анализ полученных результатов.

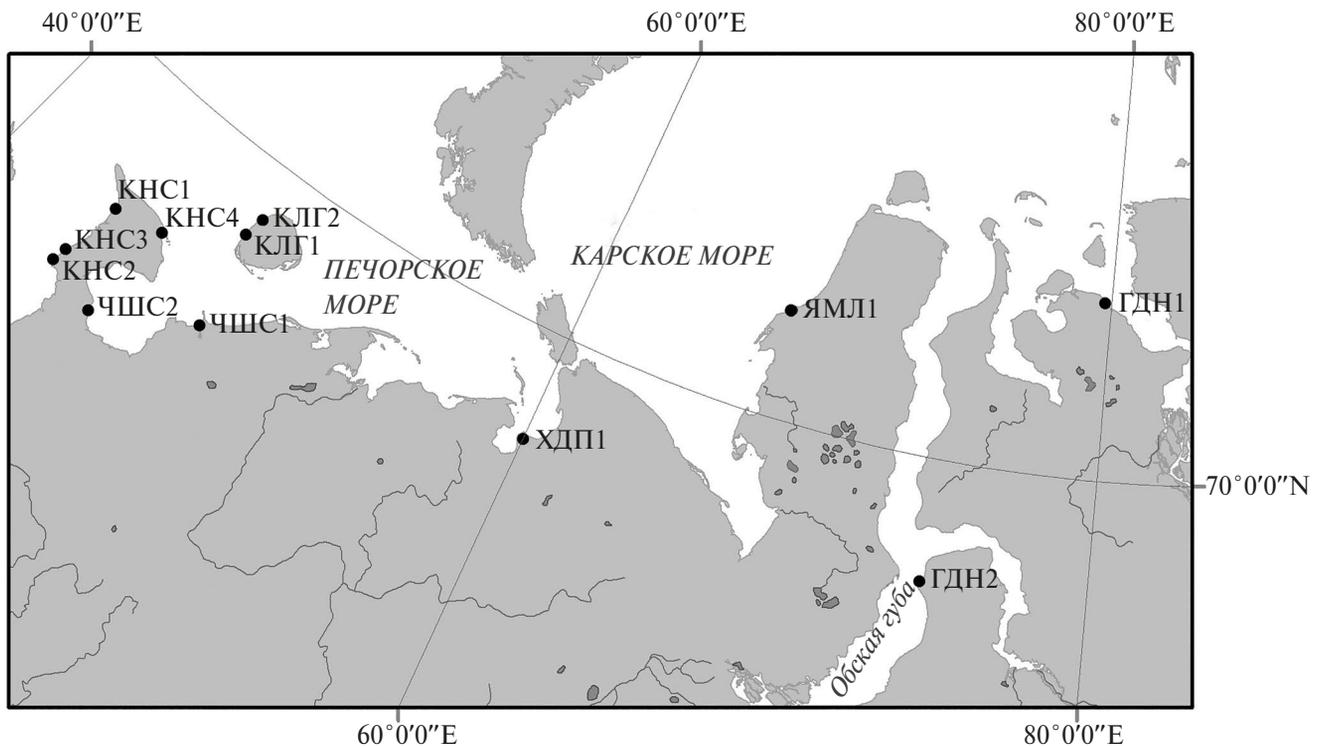


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков.

Выбор ключевых участков выполнен на основе требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических, прежде всего, геолого-геоморфологических и геокриологических условий. В итоге было выбрано 12 участков протяженностью 2.5–10.1 км, имеющих в целом прямолинейное простирание (рис. 2) и расположенных в пределах береговой линии полуостровов Канин нос, Гыданский, Тазовский и Ямал, острова Колгуев, Хайпудырской губы.

Для анализа морфологических особенностей были использованы космические снимки высокого разрешения со спутников WorldView 3 (разрешение 0.3 м/пикс), GeoEye 1 (разрешение 0.5 м/пикс), WorldView 2 (разрешение 0.5 м/пикс) и ряда других.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первой частью решения поставленной задачи является определение изменения вероятностного распределения размеров термоцирков во времени для оценки его поведения при значительном времени развития абразионного берега.

Для этого была использована предложенная ранее (Викторов, 2022) модель формирования морфологической структуры прямолинейного длинного абразионного берега (L) с однородными физико-географическими и геокриологическими условиями, предполагается также относительное постоянство во времени климатических условий. Модель базируется на следующих допущениях:

– вероятность появления новых термоцирков (в количестве $k = 1, 2, \dots$) за время Δu на отрезке береговой линии¹ Δl определяется только величинами временного интервала и отрезка²

$$p_1(\Delta l, \Delta u) = \lambda \Delta l \Delta u + o(\Delta l \Delta u),$$

$$p_k(\Delta l, \Delta u) = o(\Delta l \Delta u), k > 1,$$

где λ – параметр, отвечающий среднему числу термоцирков, формирующихся за единицу времени на единице длины береговой линии;

– размеры (длина хорды дуги) возникающих термоцирков не зависят от места их появления на участке и имеют постоянное вероятностное распределение $F_0(x)$, не зависящее от времени³.

¹ За положение термоцирка условно принято положение точки правой границы его хорды (начальная точка).

² $o(\Delta x)$ здесь и далее в соответствии с обычными обозначениями – бесконечно малая более высокого порядка, чем Δx .

³ Предполагаем, что распределение $F_0(x)$ и другие распределения в работе имеют конечные среднее и дисперсию.

Анализ позволил показать (Викторов, 2022), что в этом случае появление новых термоцирков отвечает пуассоновскому случайному процессу, то есть вероятность появления k термоцирков на длине l за время u дается выражением

$$P_\mu(k) = \frac{(\lambda ul)^k}{k!} e^{-\lambda ul}. \quad (1)$$

Отсюда, если интересующий отрезок берега имеет размер Δv , вероятность однократного попадания правой границы формирующегося термоцирка внутрь этого отрезка за интервал времени Δu , исходя из предположений модели и пуассоновского характера процесса появления новых термоцирков (1), составляет

$$q = \lambda \Delta v \Delta u + o(\Delta u), \quad (2)$$

а вероятность непопадания правой границы формирующегося термоцирка внутрь этого отрезка равна

$$p_0^1 = e^{-\lambda \Delta v u}. \quad (3)$$

Кроме того, показано, что вероятность того, что рассматриваемый термоцирк не будет ни задет, ни стерт за время u формирующимся термоцирком с начальной точкой вне рассматриваемого термоцирка дается выражением

$$p_0^2 = e^{-\lambda a u}, \quad (4)$$

где a – математическое ожидание (средний размер) формирующихся (молодых) термоцирков.

На первом этапе получим уравнение для изменения вероятностного распределения размера термоцирка (длины хорды дуги термоцирка) во времени. Пусть размеры термоцирков в момент u имеют вероятностное распределение $F(x, u)$ ⁴. Рассмотрим поведение термоцирка за интервал времени $(u, u + \Delta u)$, возможны следующие случаи (рис. 2):

а) термоцирк остался без изменений,

б) разбиение более старого термоцирка на два элемента со стиранием некоторой части за счет формирования нового термоцирка внутри границ существующего (“внутреннее стирание”), при этом происходит увеличение общего числа термоцирков,

в) стирание части термоцирка (и соответственно части хорды) за счет наложения более молодых (“боковое стирание”),

г) полное стирание термоцирка (и соответственно хорды) при наложении сформировавшегося более молодого.

⁴ Предполагаем, что распределение имеет конечные математическое ожидание и дисперсию, а также частные производные и непрерывные смешанные производные.

Три последних случая сопровождается появлением на том или ином участке нового сформировавшегося термоцирка (д).

Пусть общее число термоцирков в момент u равно n_0 , и число термоцирков с хордой меньше x соответственно составляет

$$n_1(x, u) = n_0 F(x, u).$$

Рассмотрим существующий термоцирк, имеющий размер y (длина хорды), введем систему координат с нулем в правом конце хорды и направленную влево. Определим математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x в момент $u + \Delta u$.

В случае (а) то, что термоцирк размером y не будет ни стерт, ни задет за интервал времени Δu , отвечает выполнению условия, состоящего в том, что начальная точка формирующегося термоцирка находится вне существующего термоцирка, но при этом термоцирк не задет (рис. 3а). С учетом пуассоновского характера процесса, формул (3) и (4), а также независимости рассматриваемых событий искомая вероятность дается выражением

$$p_0 = e^{-\lambda(a+y)\Delta u} = 1 - \lambda(a+y)\Delta u + o(\Delta u).$$

Соответственно математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x в момент $u + \Delta u$ при условии числа термоцирков n_0 в момент u в случае (а) может быть получено путем интегрирования полученной выше вероятности для учета всех возможных размеров термоцирков с последующим умножением на число термоцирков n_0 в момент u ,

$$N_0(x, u + \Delta u | n_0) = n_0 \int_0^x f(y, u) [1 - \lambda(a+y)\Delta u] dy + o(\Delta u),$$

где $f(y, u)$ – плотность распределения размера термоцирка в момент u .

Вероятность внутреннего стирания ((b) см. выше) термоцирка размером y определяется тем, что как одна, так и вторая граничные точки нового оползня находятся внутри существующего, при этом возможны три варианта b1–b3:

(b1) $0 < y < x$ (рис. 3б), при этом в любом случае происходит разбиение на два остаточных термоцирка с хордой меньше x , и с учетом равновероятности расположения начальной точки на любом отрезке Δy хорды (допущение 1) с вероятностью, данной в выражении (2), и учитывая условие, чтобы хорда нового термоцирка при этом не перекрывала конечную точку существующего (чтобы не было бокового стирания), интегрированием получаем вероятность внутреннего стирания за интервал времени Δu

$$p_1 = \lambda \Delta u \int_0^y F_0(y-v) dv = \lambda \Delta u \int_0^y F_0(v) dv;$$

соответственно, математическое ожидание числа термоцирков при условии числа термоцирков n_0 в момент u может быть получено путем интегрирования полученной выше вероятности для учета всех возможных размеров существующего термоцирка (y) и с учетом формирования двух новых термоцирков с последующим умножением на число термоцирков n_0 в момент u ,

$$N_1^1(x, u + \Delta u | n_0) = 2n_0 \lambda \Delta u \int_0^x f(y, u) \int_0^y F_0(v) dv dy.$$

(b2) $x < y < 2x$ (при этом $y - x < x$) (рис. 3в), в этом случае, если начальная и конечная точки формирующегося термоцирка находятся на отрезке $[0, y - x]$ (рис. 3в дуги 1 и 6), или начальная и конечная точки находятся на отрезке $[x, y]$, то образуется только один остаточный термоцирк с хордой меньше x ; если начальная точка находится на отрезке $[0, x]$ и конечная – на отрезке $[y - x, y]$ (рис. 3в дуги 2–5), то образуется два термоцирка с хордой меньше x . Соответственно, определяя перечисленные вероятности интегрированием, далее математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x в момент $u + \Delta u$ при условии числа термоцирков n_0 в момент u можно получить путем интегрирования полученных вероятностей для учета всех возможных размеров существующего в момент u термоцирка с последующим умножением на число термоцирков n_0 в момент u ,

$$N_1^2(x, u + \Delta u | n_0) = n_0 \lambda \Delta u \int_x^{2x} f(y, u) \left\{ 1 \cdot \int_0^{y-x} F_0(y-x-v) dv + 2 \int_0^{y-x} [F_0(y-v) - F_0(y-x-v)] dv \right\} dy +$$

$$+ n_0 \lambda \Delta u \int_x^{2x} f(y, u) \left\{ 2 \int_{y-x}^x F_0(y-v) dv + 1 \int_x^y F_0(y-v) dv \right\} dy + o(\Delta u).$$

⁵ Напомним, в соответствии с принятым выше конечная точка хорды расположена всегда левее начальной.

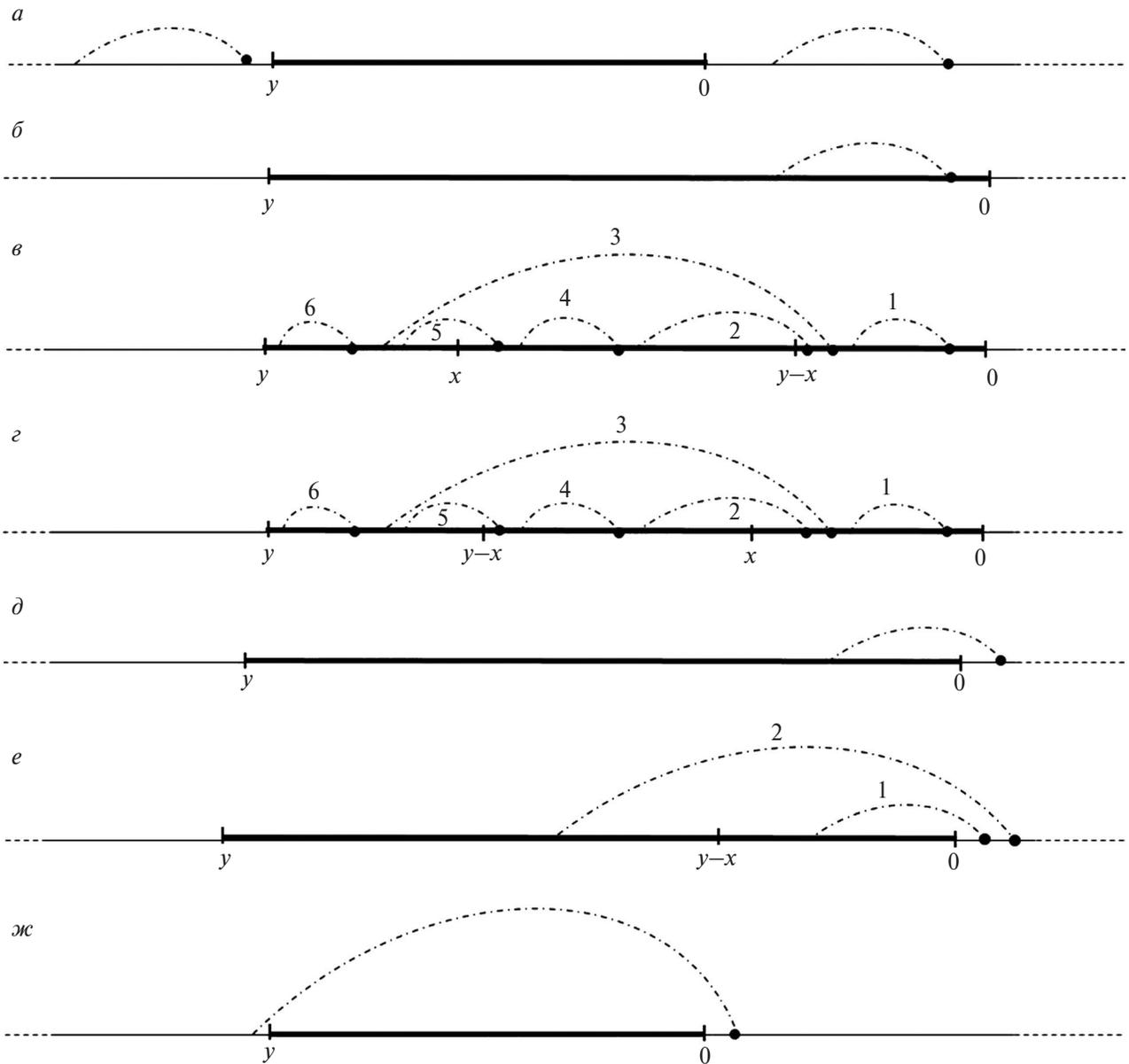


Рис. 3. Различные виды взаимодействия существующего термоцирка и нового формирующегося термоцирка (по-яснения в тексте); случаи взаимодействия: *a* – отсутствие стирания, *б*, *в*, *г* – внутреннее стирание, *д*, *е* – боковое стирание, *ж* – полное стирание. Условные обозначения: тонкая линия – береговая линия, толстая линия – хорда существующего рассматриваемого термоцирка, черная точка – начальная точка дуги формирующегося термоцирка, штриховая дуга – дуга формирующегося термоцирка, цифры – различные варианты взаимного расположения термоцирков.

Преобразуя и упрощая, получаем

$$N_1^2(x, u + \Delta u | n_0) = n_0 \lambda \Delta u \int_x^{2x} f(y, u) \left[2 \int_{y-x}^y F_0(v) dv \right] dy + o(\Delta u).$$

(b3) $2x < y$ (при этом $x < y - x$) (рис. 3г), в этом случае, если начальная точка формирующегося термоцирка находится на отрезке $[0, x]$, и конечная

точка – на отрезке $[0, y - x]$ (рис. 3г дуги 1 и 2), или начальная точка находится на отрезке $[x, y]$, и конечная точка находится на отрезке $[y - x, y]$ (рис. 3г дуги 5 и 6), то образуется только один остаточный термоцирк с хордой меньше x ; в случае, если начальная точка формирующегося термоцирка находится на отрезке $[0, x]$, и конечная точка – на отрезке $[y - x, y]$ (рис. 3г дуга 3), то образуется два остаточных термоцирка с хордой меньше x ; на- конец в случае, если начальная и конечная точки

формирующегося термоцирка находятся на отрезке $[x, y - x]$ (рис. 3г дуга 4), то не образуется остаточных термоцирков с хордой меньше x . Соответственно, определяя перечисленные вероятности интегрированием, далее математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x в момент

$u + \Delta u$ при условии числа термоцирков n_0 в момент u можно получить путем интегрирования полученных вероятностей для учета всех возможных размеров существующего в момент u термоцирка с последующим умножением на число термоцирков n_0 в момент u ,

$$N_1^3(x, u + \Delta u | n_0) = n_0 \lambda \Delta u \int_{2x}^{+\infty} f(y, u) \left\{ 1 \cdot \int_0^x F_0(y - x - v) dv + 2 \cdot \int_0^x [F_0(y - v) - F_0(y - x - v)] dv \right\} dy +$$

$$+ n_0 \lambda \Delta u \int_{2x}^{+\infty} f(y, u) \left\{ 1 \cdot \int_x^{y-x} [F_0(y - v) - F_0(y - x - v)] dv + 1 \cdot \int_{y-x}^y F_0(y - v) dv \right\} dy + o(\Delta u).$$

Преобразуя и упрощая, получаем

$$N_1^3(x, u + \Delta u | n_0) =$$

$$= n_0 \lambda \Delta u \int_{2x}^{+\infty} f(y, u) \left[2 \int_{y-x}^y F_0(v) dv \right] dy + o(\Delta u).$$

Суммируя математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x при условии числа термоцирков n_0 в момент u по всем трем вариантам и упрощая, получаем для внутреннего стирания величину математического ожидания числа термоцирков с хордой меньше x

$$N_1(x, u + \Delta u | n_0) = n_0 2 \lambda \Delta u \int_0^x f(y, u) \int_0^y F_0(v) dv dy +$$

$$+ n_0 2 \lambda \Delta u \int_x^{+\infty} f(y, u) \int_{y-x}^y F_0(v) dv dy + o(\Delta u).$$

Вероятность бокового стирания ((с) см. выше) термоцирка размером y определяется тем, что одна концевая точка нового формирующегося термоцирка находится вне существующего, а вторая – внутри существующего, при этом возможны следующие варианты (с1–с2):

(с1) $0 < y < x$ (рис. 3д), при этом, если начальная точка находится справа от существующего термоцирка, то вероятность бокового стирания определяется выполнением условия, что размер формирующегося термоцирка должен быть достаточен, чтобы задеть существующий термоцирк, но при этом не перекрывать его конечную точку, чтобы не было полного стирания. С учетом пуассоновского характера процесса появления новых термоцирков и большой длины берега, а также равной вероятности бокового стирания как справа, так и слева, упрощая, с последующим умножением на число термоцирков n_0 в момент u , получаем математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x при условии числа термоцирков n_0 в момент u

$$N_2^1(x, u + \Delta u | n_0) = 2n_0 \lambda \Delta u \int_0^x f(y, u) \int_0^{+\infty} [F_0(y + v) - F_0(v)] dv dy =$$

$$= 2n_0 \lambda \Delta u \int_0^x f(y, u) \int_0^y [1 - F_0(v)] dv dy + o(\Delta u)$$

(с2) $x < y$ (рис. 3е), в этом варианте при выполнении названных условий, если конечная точка находится на отрезке $[y - x, y]$, то образуется только один термоцирк с хордой меньше x , в противном случае не

образуется остаточных термоцирков с хордой меньше x . Аналогично предыдущему получаем математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x при условии числа термоцирков n_0 в момент u

$$N_2^2(x, u + \Delta u | n_0) = 2n_0 \lambda \Delta u \int_x^{+\infty} f(y, u) \int_0^{+\infty} [F_0(y + v) - F_0(y - x + v)] dv dy = 2n_0 \lambda \Delta u \int_x^{+\infty} f(y, u) \int_{y-x}^y [1 - F_0(v)] dv dy + o(\Delta u).$$

Суммируя, получаем для бокового стирания математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x при условии числа термоцирков n_0 в момент u

$$N_2(x, u + \Delta u | n_0) = 2n_0 \lambda \Delta u \int_0^x f(y, u) \int_0^y [1 - F_0(v)] dv dy + + 2n_0 \lambda \Delta u \int_x^{+\infty} f(y, u) \int_{y-x}^y [1 - F_0(v)] dv dy + o(\Delta u).$$

В случае (г) (рис. 3ж) полного стирания математическое ожидание числа термоцирков равно нулю.

В случае (д) появления новых термоцирков математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x при условии числа термоцирков n_0 в момент u , появившихся за рассматриваемый интервал времени на всей длине берега L , в соответствии с пуассоновским характером процесса равно

$$N_4(x, u + \Delta u | n_0) = \lambda L \Delta u F_0(x).$$

Суммируя по всем случаям, и по всем значениям n_0 с учетом их вероятностей и упрощая, получаем математическое ожидание числа термоцирков с хордой меньше x в момент времени $u + \Delta u$

$$N(x, u + \Delta u) = N(u) \left[F(x, u) - \lambda a F(x, u) \Delta u + \lambda \Delta u \int_0^x y f(y, u) dy + 2 \lambda \Delta u x [1 - F(x, u)] \right] + \lambda L \Delta u F_0(x) + o(\Delta u),$$

где $N(u)$ – математическое ожидание общего числа термоцирков в момент u .

Переходя к пределу при $x \rightarrow +\infty$, учитывая равенство для среднего размера термоцирка

$$h(u) = \frac{L}{N(u)} = \int_0^{+\infty} y f(y, u) dy = \frac{1}{\gamma(u)}, \tag{5}$$

где $\gamma(u)$ – средняя линейная плотность расположения термоцирков вдоль береговой линии, а также следующее из конечности момента второго порядка функции распределения размера термоцирка равенство

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [x [1 - F(x, u)]] = 0,$$

получаем математическое ожидание общего числа термоцирков в момент времени $u + \Delta u$

$$N(u + \Delta u) = N(u) - N(u) \lambda a \Delta u + + 2N(u) \lambda \Delta u \int_0^{+\infty} y f(y, u) dy + o(\Delta u).$$

Отсюда, деля на L и Δu и переходя к пределу при $\Delta u \rightarrow 0$, нетрудно получить с учетом (5) дифференциальное уравнение для изменения средней линейной плотности расположения термоцирков

$$\frac{d\gamma(u)}{du} = 2\lambda - \lambda a \gamma(u).$$

После его решения стандартными методами для начального условия $\gamma(0) = \frac{1}{a}$ (так как в начальный момент нет наложения и стирания термоцирков, и средний размер равен среднему размеру формирующихся термоцирков) изменение математического ожидания размера термоцирка со временем дается следующим выражением

$$h(u) = \frac{a}{2 - e^{-\lambda a u}}. \tag{6}$$

Примем за вероятность термоцирка размера не более x в момент $u + \Delta u$ при большом количестве термоцирков отношение математического ожидания числа термоцирков с размером меньше x к математическому ожиданию общего числа термоцирков в момент $u + \Delta u$

$$F(x, u + \Delta u) = \frac{N(u) \left[F(x, u) - \lambda a F(x, u) \Delta u + \lambda \Delta u \int_0^x y f(y, u) dy + 2 \lambda \Delta u x [1 - F(x, u)] \right] + \lambda L \Delta u F_0(x) + o(\Delta u)}{N(u) - N(u) \lambda a \Delta u + 2N(u) \lambda \Delta u \int_0^{+\infty} y f(y, u) dy + o(\Delta u)}$$

Вычитая значение вероятности $F(x, u)$ в момент u , упрощая, деля на Δu , $N(u)$ и переходя к пределу

при $\Delta u \rightarrow 0$, получаем уравнение для распределения размера термоцирка

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial F(x, u)}{\partial u} = \int_0^x y f(y, u) dy + 2x[1 - F(x, u)] + F_0(x)h(u) - 2F(x, u)h(u)$$

с условиями в начальный момент $F(x, 0) = F_0(x)$ и $F(0, u) = 0$, вытекающими из того, что размер не может быть отрицательным, в начальный момент термоцирки не перекрываются, и в этот момент распределение отвечает распределению размеров формирующихся новых термоцирков.

Следующим этапом является решение полученного уравнения. Переходя к новой неизвестной функции $\phi(x, u)$

$$\phi(x, u) = \int_0^x F(v, u) dv, \tag{7}$$

меняя порядок дифференцирования в получившихся смешанных производных⁶ и интегрируя по x , сводим уравнение к следующему

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \phi(x, u)}{\partial u} + [x + 2h(u)]\phi(x, u) = x^2 + h(u)I(x) + C(u),$$

где

$$I(x) = \int_0^x F_0(v) dv,$$

$C(u)$ – некоторая функция, зависящая только от u . Это уравнение можно рассматривать как линейное неоднородное дифференциальное уравнение по u , и при решении стандартным способом с учетом условий начальный момент окончательно получаем

$$\phi(x, u) = \exp(-\lambda x u - 2\lambda \int_0^u h(v) dv) \left[\lambda \int_0^u [x^2 + h(s)I(s)] \exp(\lambda x s + 2\lambda \int_0^s h(v) dv) ds + \int_0^x F_0(v) dv \right].$$

Искомое вероятностное распределение размеров термоцирков может быть сформировано в со-

ответствии с (7) дифференцированием полученного решения

$$F(x, u) = \varepsilon(x, u) \left[-\lambda^2 u \int_0^u \frac{x^2 + h(s)I(s)}{\varepsilon(x, s)} ds + \lambda \int_0^u \frac{2x + h(s)F_0(x) + \lambda s x^2 + \lambda s h(s)I(s)}{\varepsilon(x, s)} ds \right] + \varepsilon(x, u) \left[-\lambda u \int_0^x F_0(v) dv + F_0(x) \right], \tag{8}$$

где $\varepsilon(x, u) = \exp[-\lambda x u - 2\lambda \int_0^u h(v) dv]$.

Наконец, последним этапом в соответствии с поставленной задачей является оценка поведения полученного распределения при большом времени развития. Переходя к пределу при $u \rightarrow +\infty$ в выраже-

нии (8), дважды используя правило Лопиталья (условия, как нетрудно видеть, соблюдаются (Фихтенгольц, т. 1, 1970. п. 151)) и изменение среднего размера термоцирка со временем (6), окончательно получаем, что существует предел вероятностного распределения размеров термоцирков, и он равен

$$\lim_{u \rightarrow +\infty} F(x, u) = F(x) = 1 - \frac{a[1 - F_0(x)]}{[x + a]} - \frac{a - \int_0^x [1 - F_0(v)] dv}{[x + a]^2}, \tag{9}$$

где $a, F_0(x)$ – соответственно математическое ожидание (средний размер) и распределение размера формирующихся молодых термоцирков.

⁶ Необходимые условия (Фихтенгольц, т. 1, 1970, п.190) соблюдаются (см. сноску 3).

Таблица 1. Результаты оценки соответствия выборок размеров термоцирков на ключевых участках различным видам теоретических распределений

Участок	Объем выборки	Нормальное распределение			Логнормальное распределение			Гамма-распределение		
		среднее м	стандарт м	p	среднее логарифма	стандарт логарифма	p	λ	α	p
КНС1	183	50	43	0.000	3.675	0.666	0.288	22.66	2.22	0.015
КНС2	181	60	43	0.000	3.881	0.639	0.241	23.18	2.57	0.010
КНС3	181	23	15	0.000	2.951	0.586	0.782	7.63	2.99	0.131
КНС4	159	46	27	0.000	3.678	0.529	0.339	12.40	3.68	0.153
ЯМЛ1	108	18	11	0.000	2.751	0.504	0.574	4.71	3.81	0.314
КЛГ1	113	24	89	0.057	3.108	0.156	0.254	3.51	6.87	0.331
КЛГ2	108	25	105	0.020	3.16	0.151	0.923	3.74	6.80	0.640
ХПД1	111	31	118	0.309	3.36	0.14	0.694	3.93	7.82	0.842
ЧШС1	290	22	115	0.000	3.004	0.235	0.015	4.91	4.60	0.037
ЧШС2	278	15	100	0.000	2.532	0.312	0.545	4.622	3.21	0.113
ГДН1	190	14	40	0.000	2.564	0.195	0.658	2.637	5.42	0.305
ГДН2	319	22	344	0.000	2.832	0.449	0.235	9.56	2.25	0.006

Примечание. λ – масштабный параметр, α – параметр формы, p – параметр согласия распределений (разница эмпирического и теоретического распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае $p < 0.01$).

Второй частью решения поставленной задачи явилось выполнение исследований размеров термоцирков (длин хорд) на конкретных участках, включающее получение выборок длин хорд для термоцирков каждого участка и их сопоставление с теоретическими распределениями для выявления характерных особенностей распределений⁷. Выбор ключевых участков выполнен, как упоминалось выше, на основе требований относительной морфологической однородности участка и однородности физико-географических, прежде всего геолого-геоморфологических, условий; таким образом, внутри каждого участка отсутствуют существенные физико-географические отличия.

На снимках были отдешифрированы бровки склонов и выделены дугообразные границы термоцирков с прилегающей водораздельной поверхностью, а также проведены хорды дуг. Измерение хорд выполнялось с помощью средств геоинформационной системы ArcGIS. Полученные выборки сопоставлялись с теоретическими распределениями различных видов; сопоставление выполнялось с использованием критерия согласия хи-квадрат (критерия Пирсона) в программе Statistica с соблюдением стандартных требований методики по объему выборки и по величине интервалов разбиения.

Участки значительно различаются по условиям. Так, например, разные ключевые участки по данным государственных геологических карт мас-

штаба 1:200 000 сложены с поверхности морскими, ледниковыми, озерно-ледниковыми, аллювиально-морскими и озерно-аллювиальными отложениями, отложения представлены как песками, так и алевритами, гравийно-галечными отложениями, супесями и суглинками с валунами и галькой, а также отложениями алевритово-мелко-тонкопесчаного состава; многолетнемерзлые породы имеют как прерывистое, так и массивно-островное и сплошное распространение. В климатическом отношении участки относятся как к арктическому, так и субарктическому поясам.

Результаты статистической обработки по всем участкам приведены в табл. 1.

Анализ сходства эмпирических распределений длин хорд с различными видами теоретических распределений (нормальное, логнормальное и гамма-распределение) дает интересные результаты. На всех двенадцати участках на уровне значимости 0.99 наблюдается согласие с одним и тем же видом распределения – логнормальным. Это выполняется при значительной разнице значений параметров распределения на разных участках. Гамма-распределение также соответствует эмпирическим данным, но несколько хуже; это можно объяснить общим сходством логнормального распределения и гамма-распределения. Нормальное распределение не согласуется с эмпирическими данными ни на одном участке.

На рис. 4 показаны примеры соответствия эмпирических распределений и теоретических логнормальных распределений для разных участков.

⁷ Выполнено совместно с М.В. Архиповой, В.В. Бондарь, Т.В. Гониковым (Викторов и др., 2023).

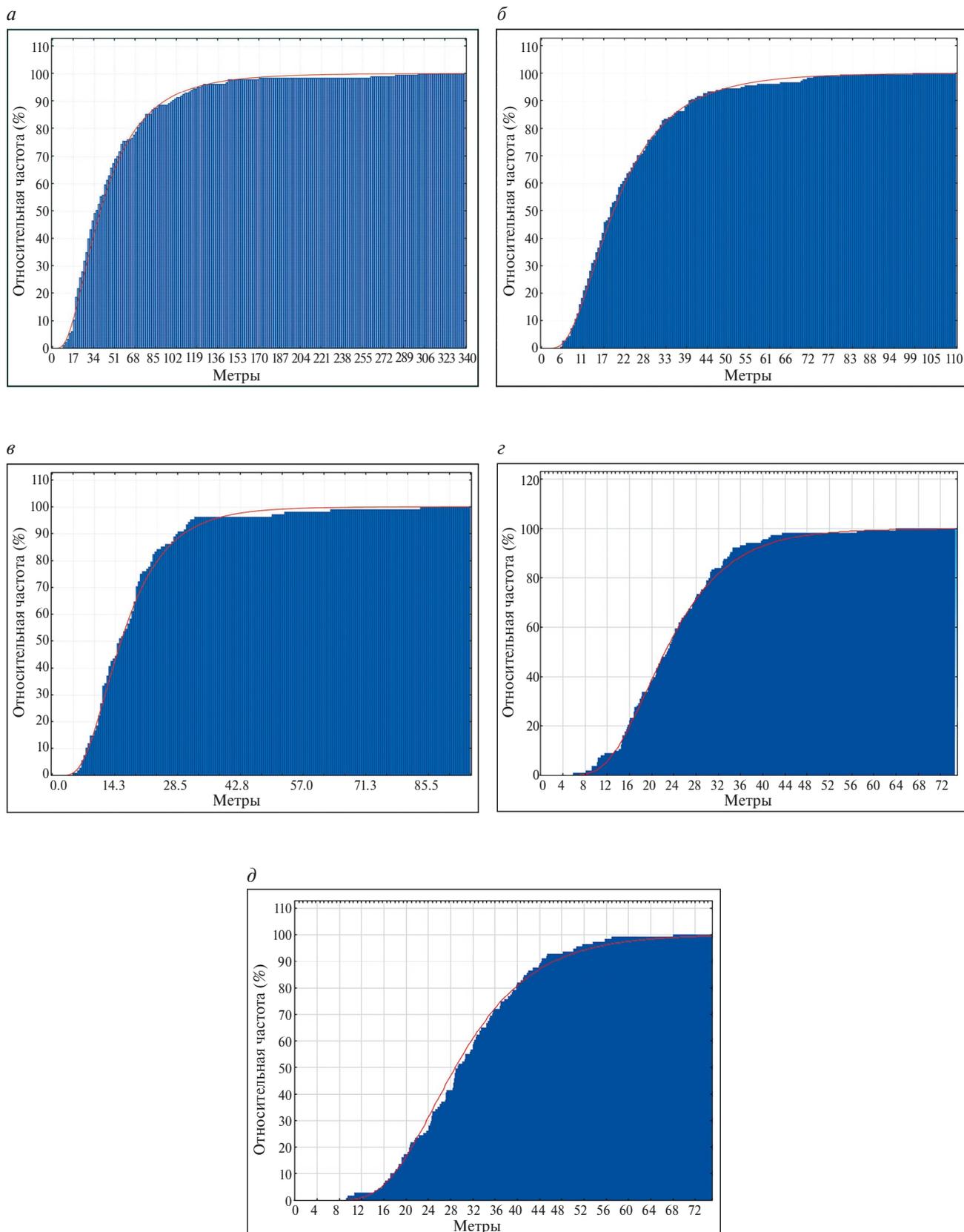


Рис. 4. Примеры соответствия эмпирических распределений (синий контур) и теоретических логнормальных распределений (красная линия) по ключевым участкам (*a* – КНС1, *б* – КНС3, *в* – ЯМЛ1, *г* – КЛГ1, *д* – ХПД1).

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, математическое моделирование процесса изменения морфологической структуры абразионных берегов криолитозоны показало, что в разных физико-географических и геокриологических условиях при значительном времени развития формируется устойчивое стационарное распределение размеров термоцирков. Это распределение формируется в условиях постоянного возникновения новых термоцирков, а также полного или частичного (внутреннего и бокового) стирания уже существующих; в силу этого наблюдаемое в каждый момент, прежде всего, на материалах космической съемки, распределение размеров термоцирков не совпадает с распределением размеров формирующихся новых термоцирков. Таким образом, полученный результат позволяет сделать вывод, что морфологическая структура абразионного берега, находясь в постоянном изменении, тем не менее, при значительном времени развития имеет стационарное распределение размеров термоцирков, их постоянный средний размер и среднюю плотность расположения, то есть, находится в состоянии динамического равновесия. Интересно, что, как показывает проведенный анализ, предельное распределение не зависит от распределения размеров термоцирков в начальный момент $F(x, 0)$.

Физико-географические, геолого-геоморфологические и геокриологические условия не влияют на факт существования предельного распределения, но влияют на характер этого распределения через распределение размеров формирующихся молодых термоцирков, взаимосвязь описывается выражением (9). В то же время, плотность генерации термоцирков (λ) не оказывает влияния на предельное распределение размеров, видимо, влияя только на скорость сходимости к предельному распределению.

Следует подчеркнуть, что нами ранее уже был предложен вариант модели развития морфологической структуры абразионных берегов (Викторов, 2022), однако в ней использовалось существенное упрощение – в ней пренебрегалось внутренним стиранием, что очень облегчало анализ, но делало его менее точным. Таким образом, настоящая модель является новой и значительно более совершенной.

Сопоставление эмпирических распределений наблюдаемых размеров термоцирков с результатами математического моделирования позволяет сделать вывод, что для разных физико-географических, в частности геолого-геоморфологических и геокриологических условий, характерен один и тот же вид распределения размеров формирующихся молодых термоцирков. Это вытекает из од-

нотипности наблюдаемых распределений размеров термоцирков (логнормальные распределения) и установленной зависимости между распределением размеров формирующихся молодых термоцирков и наблюдаемыми распределениями размеров термоцирков, описываемой выражением (9). Это же выражение позволяет при более детальном анализе прогнозировать по измерениям наблюдаемых размеров по материалам однократной космической съемки высокого разрешения и, соответственно, по вероятностному распределению этих размеров количественные характеристики процесса формирования термоцирков (и, соответственно, оползней, с образования которых начинается формирование термоцирка), а именно, распределение размеров возникающих новых термоцирков и оползней.

Полученные результаты представляются существенными и в практическом отношении при прогнозе развития, в частности, отступания, берегов, вследствие установленных ранее корреляций размеров термоцирков и стрелок ограничивающих их дуг (Викторов и др., 2023), которые тесно связаны со скоростью отступания.

ВЫВОДЫ

Абразионные берега криолитозоны развиваются под действием комплекса процессов, включающего как увеличение, так и уменьшение числа термоцирков за счет и формирования новых термоцирков, и в той или иной мере стирания существующих; в силу этого наблюдаемое в каждый момент, прежде всего, на материалах космической съемки, распределение размеров термоцирков в общем случае не совпадает с распределением размеров формирующихся новых термоцирков.

Комплекс математического моделирования и космических методов позволил показать, что в разных физико-географических и геокриологических условиях при значительном времени развития на однородных участках формируется устойчивое стационарное распределение размеров термоцирков абразионных берегов криолитозоны Арктики. Различия условий разных участков не влияют на факт существования предельного стационарного распределения. Таким образом, морфологическая структура абразионного берега, находясь в постоянном изменении, тем не менее, имеет стационарное распределение размеров термоцирков, их постоянные средний размер и среднюю плотность расположения, то есть находится в состоянии динамического равновесия.

Получена зависимость устойчивого стационарного распределения размеров термоцирков

абразионных берегов от распределения размеров формирующихся молодых термоцирков. Физико-географические, геолого-геоморфологические и геокриологические условия участков влияют на характер стационарного предельного распределения через распределение размеров формирующихся молодых термоцирков.

Сопоставление эмпирических распределений наблюдаемых по материалам космической съемки размеров термоцирков с результатами математического моделирования позволяет сделать вывод, что для разных физико-географических, в частности, геолого-геоморфологических и геокриологических, условий характерен один и тот же вид распределения размеров формирующихся молодых термоцирков; условия влияют только на значения параметров распределения.

Полученные результаты позволяют прогнозировать по измерениям по материалам однократной космической съемки высокого разрешения наблюдаемых размеров термоцирков, количественные характеристики процесса формирования термоцирков, а именно, распределение размеров возникающих новых термоцирков; это существенно при прогнозе развития, в частности, отступления, берегов вследствие существующей корреляции размеров термоцирков и стрелок ограничивающих их дуг.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках госзадания тема № FMWM-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А., Камалов А.М., Кузнецов Д.Е., Баранская А.В., Новикова А.В.* Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 85–96.
- Васильев А.А., Покровский С.И., Шур Ю.Л.* Динамика термоабразионных берегов западного Ямала // Криосфера Земли. 2001. С. 44–52.
- Викторов А.С.* Моделирование морфологических особенностей абразионных берегов с развитием оползневых процессов в криолитозоне // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2022. № 6. С. 28–36.
- Викторов А.С., Орлов Т.В., Архипова М.В., Капралова В.Н., Бондарь В.В.* Количественные закономерности морфологического строения абразионных берегов с развитием оползневых процессов в пределах криолитозоны (на примере побережий полуостровов Канин и Ямал) // Геоморфология и палеогеография. 2023. Т. 54. № 3. С. 124–137. <https://doi.org/10.31857/S294917892303012X>; <https://elibrary.ru/WETHFU>.
- Новикова А.В.* Морфология и динамика термоабразионных берегов Карского моря: автореф. дис. ... кан. геогр. наук. — М.: МГУ 2022. 26 с.
- Кизяков А.И.* Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли, 2005. Т. IX. № 1. С. 63–67.
- Пижанкова Е.И., Добрынина М.С.* Динамика побережья Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков) // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. 4. С. 66–79.
- Совершаев В.А.* Криогенные процессы и явления на побережье и шельфе арктических морей // Динамика арктических побережий России. М., Изд-во МГУ, 1998. С. 12–18.
- Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. М., Наука, 1970. 608 с.
- Хомутов А.В., Лейбман М.О.* Ландшафтные факторы изменения скорости термоденудации на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли, 2008. Т. XII. № 4. С. 24–35.
- Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V., Vergun A.P., et al.* Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // In IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. № 193. No. 012003.
- Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N.* Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // J. of Coastal Research. 2020. № 95. P. 367–371.
- Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y., Sonyushkin A., Zimin M.* Coastal Retreat Due to Thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the Last Decade, Update since 2001–2010. // Remote Sensing. 2021. 13. 4042. P. 21.

Study of Dynamics Regularities for Morphological Pattern of Abrasion Shores of Cryolithozone Based on Complexing Mathematical Modeling and Space Imagery

A. S. Victorov¹

¹*Federal State Budgetary Institution of Science Sergeev Institute of Environmental Geoscience of Russian Academy of Science (IEG RAS) Moscow, Russia*

The article is devoted to the study of dynamics regularities of abrasion shores of the cryolithozone based on complex mathematical modeling and space imagery and their significance for obtaining information on dynamic parameters of ongoing processes based on remote sensing data. The studied landscape of abrasion shores is a combination of thermal cirques of different ages and preservation, it develops under the action of processes of both the appearance of new thermal cirques and partial or complete erasure of existing ones due to the formation of new ones. The characteristic feature of thermal cirques is a clear arc-shaped boundary with the adjacent watershed surface, which is well detected on remote sensing data. The technique includes creating and analyzing a

mathematical model of the morphological pattern changes of abrasion shores within the cryolithozone. The model uses the approach of the random process theory and empirical measurement of thermal cirques in different physiographic conditions on space imagery. The combination of mathematical modeling with space imagery interpretation allowed us to show that in different physiographic and geocryological conditions, a stable stationary distribution of thermal cirque sizes of abrasion shores of the Arctic cryolithozone is formed with a significant development time in homogeneous areas. The physiographic and geocryological variety of different sites does not prevent the existence of the limiting stationary distribution. Thus, the morphological pattern of the abrasion shore, being in constant change, nevertheless has a stationary distribution of thermal cirque sizes, their average size, and average location density, i.e., it is in a state of dynamic balance. The research gave a mathematical dependence between the limiting thermal cirque size distribution for abrasion shores and the size distribution for forming young thermal cirques. The sites' physical-geographical, geological-geomorphological, and geocryological conditions influence the character of the stationary limit distribution through the size distribution of forming young thermal cirques. The results obtained allow us to predict quantitative characteristics of the thermal cirques (and consequently landslides) formation process, namely, the size distribution of emerging new thermal cirques and landslides, based on measurements of the observed thermal cirque sizes using high-resolution single-shot remote sensing data. This is essential in predicting the development, in particular, of shore retreat.

Keywords: mathematical morphology of landscapes, abrasion shores, cryolithozone, mathematical models of landscape morphological patterns, remote sensing data, mathematical modeling

REFERENCES

- Aleksyutina D.M., Shabanova N.N., Kokin O.V., Vergun A.P., et al.* Monitoring and modelling issues of the thermoabrasive coastal dynamics // In IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2018. № 193. No. 012003.
- Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N.* Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // J. of Coastal Research. 2020. № 95. P. 367–371.
- Belova N.G., Shabanova N.N., Ogorodov S.A., Kamalov A.M., Kuznetsov D.E., Baranskaya A.V., Novikova A.V.* Dynamics of thermal abrasion coasts of the Kara Sea in the area of Cape Kharasavey (Western Yamal) // Kriosfera Zemli. 2017. V. 21. No. 6. P. 85–96. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(85-96\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(85-96)). (In Russian).
- Fikhtengolts G.M.* Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya (Course of differential and integral calculus). V. 1. Moscow, Nauka, 1970. 608 p. (In Russian).
- Khomutov A.V., Leibman M.O.* Landscape controls of thermodenudation rate change on Yugorsky peninsula coast // Kriosfera Zemli. 2008. V. XII. No. 4. P. 24–35. (In Russian).
- Kizyakov A.I.* The dynamics of thermodenudation processes at the yugorsky peninsula coast // Kriosfera Zemli. 2005. V. IX. No. 1. P. 63–67. (In Russian).
- Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y, Sonyushkin A., Zimin M.* Coastal Retreat Due to Thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the Last Decade, Update since 2001–2010. // Remote Sensing. 2021. 13. 4042. P. 21. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>.
- Novikova A.V.* Morphology and dynamics of thermal abrasion coasts of the Kara Sea: PhD thesis. – Moscow.: 2022. 26 p. (In Russian).
- Pizhankova E.I., Dobrynina M.S.* Dynamics of the coast of the Lyakhovsky Islands (results of interpretation of aerospace images). // Kriosfera Zemli. 2010. Vol. XIV. 4. S. 66–79. (In Russian).
- Sovershayev V.A.* Cryogenic processes and phenomena on the coast and shelf of the Arctic seas // Dinamika arkticheskikh poberezhnykh Rossii (Dynamics of the Arctic coasts of Russia.) Moscow, Izd-vo MGU, 1998. P. 12–18. (In Russian).
- Vasiliev A.A., Pokrovsky S.I., Shur Yu.L.* Dynamics of thermal abrasion shores of the western Yamal // Kriosfera Zemli, 2001. P. 44–52. (In Russian).
- Victorov A.S.* Modeling Morphological Features of Abrasion Landslide Coasts in Cryolithozone // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2022. No. 6. P. 28–36.
- Victorov A.S., Orlov T.V., Arkhipova M.V., Kapralova V.N., Bondar V.V.* Quantitative lows of a morphological pattern for abrasion slopes with a landslide process within the cryolithozone (the coasts of the Kanin and Yamal peninsulas as examples) // Geomorfologiya i paleogeografiya. 2023. T. 54. № 3. P. 124–137. <https://doi.org/10.31857/S294917892303012X>; <https://elibrary.ru/WETHFU>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КАРТИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ НАБОРА ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ LANDSAT 8 ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ПОЛЯРНОГО УРАЛА

© 2025 г. Ю. Н. Иванова^{1,2, *}

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.06.2024 г.

Впервые по материалам космической съемки космического аппарата дистанционного зондирования Земли Landsat 8 выполнено картирование гидротермально-метасоматических изменений для территорий восточного склона Полярного Урала, перспективных на выявление золоторудной минерализации (с севера на юг): Щучинская зона (Юньягинское месторождение), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район (месторождения Новогоднее-Монто и Петропавловское) и центральная часть Малоуральской зоны (Мануюлю-Ворчатинский рудный узел). Исследование проведено с целью выявления схожих закономерностей в распределении гидротермально-метасоматических изменений для разработки прогнозно-поискового критерия (вещественного) на золоторудный тип минерализации. Таким образом, было установлено, что на перспективных на золоторудную минерализацию площадях для восточного склона Полярного Урала должны быть локализованы интрузии основного состава, с которыми генетически связана золоторудная минерализация, и проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксида железа (III) и оксида железа (II), и в меньшей степени – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), а также гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы.

Ключевые слова: золоторудная минерализация, линеаменты, гидротермально-метасоматические изменения, Полярный Урал, Landsat 8

DOI: 10.31857/S0205961425010041, EDN: DHTMEV

ВВЕДЕНИЕ

Спектральные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в практике геологоразведочных работ стали применяться в 1970-х годах благодаря внедрению многоспектральных фотографий земной поверхности. Сегодня подобные методы широко используются наряду с традиционными (геологическими, геофизическими, геохимическими и др.) для прогнозирования различных типов рудной минерализации (di Tommaso, Rubinstein 2007; Zhang et al. 2007; Pour, Hashim, 2011; Amer et al., 2012).

В последнее время Арктика привлекает большое внимания научных кругов по всему миру, и все больше научных миссий нацелены на этот регион из-за огромных и разнообразных запасов полезных ископаемых (ПИ), которые все еще плохо изучены.

Решение многих специфических задач в Арктике, включая прогнозирование залежей руды, также может быть решено с помощью космических технологий, обеспечивающих множество преимуществ для исследовательских и опытно-конструкторских проектов на этой площади, позволяющих проводить ширококомасштабные и относительно рентабельные наблюдения и сбор данных в регионе с ограниченной наземной инфраструктурой (Bohlmann, Koller, 2020).

В настоящее время в специализированных журналах и книгах, посвященных ДЗЗ, очень мало работ по теме прогнозирования рудной минерализации и картированию гидротермально-метасоматических изменений на арктической территории (например, Pour, Hashim, 2012; Graham et al., 2017; Иванова и др., 2022, 2023 и др.).

В данной статье представляются результаты картирования гидротермально-метасоматических изменений по данным мультиспектральных спутниковых изображений с космического аппарата (КА) ДЗЗ Landsat 8 для территорий восточной части Полярного Урала, входящих в Российскую часть Арктики. Это исследование поможет выявить вещественный прогнозно-поисковый критерий для золоторудной минерализации, который может быть использован в качестве вспомогательного средства для разведки ПИ в других районах Полярного Урала и северных широтах.

Выбраны следующие площади (с севера на юг): Щучьинская зона (Юньягинское месторождение), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район (месторождения Новогоднее-Монто и Петропавловское) и центральная часть Малоуральской зоны (Манюкую-Ворчатинский рудный узел), являющиеся наиболее перспективными на выявление золоторудной минерализации.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИЗУЧАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Полярно-Уральский сегмент Восточно-Уральской мегазоны разделяют на Щучьинскую и Войкарскую зоны (рис. 1).

Эти зоны характеризуются осадочно-вулканогенными отложениями с широко проявленным плутоническим и гипабиссальным магматизмом, сравнительно слабым динамотермальным и интенсивным дислокационным метаморфизмом. Формации отвечают обстановкам океанического рифтинга островодужных систем и активной континентальной окраины (Пучков, Иванов, 2020).

Щучьинская зона – самая северная часть палеозойской островодужной системы Урала. На западе она ограничивается региональным разломом, входящим в систему Главного Уральского разлома (ГУР). Он представляет собой крупный надвиг, перекрытый мезозойскими отложениями в восточном направлении. Его фрагмент обрамляет Щучьинский синклиорий в виде дугообразных нарушений, которые сливаются в единую полукольцевую структуру.

В строении Щучьинской зоны выделяют несколько сегментов, в пределах которых установлены: палеозойские покровно-складчатые сооружения, представленные породами ордовика, силура, девона, карбона, перекрытые платформенными мезозойскими отложениями юры и триаса. Наиболее широкое развитие среди плутонических образований получили габброиды, гранитоиды имеют значительно меньшее распространение и локализованы в виде небольших штокообразных массивов площадью до 10–16 км² (Душин, 2020).

Например, с магматическими и вулканогенно-осадочными породами основного состава васькеуского и харампэйско-масловского комплексов, а также янганапэйской толщи связаны проявления и месторождения V±Ti-Fe-рудной и Cu-Fe-скарновой формаций. Осадочные породы малопайпунской и хантейской свит вмещают проявления Pb-Zn минерализации. С магматическими породами основного состава второй фазы харбей-собского комплекса связаны проявления Mo, Pb-Zn, Cu-кварцевой и скарно-магнетитовой минерализации. К магматическим породам кислого состава сядатаяхинского и евьюганского комплексов относятся месторождения и проявления As, Au, Mo и Cu минерализации. В осадочных породах хойдышорской и усинской свит локализована Cu и Au минерализация, а в метаморфических и осадочных породах орангской свиты – полиметаллическая минерализация. С магматическими породами ультраосновного состава сьум-кеуского комплекса и дайками серпентинитов хартманюшорского комплекса пространственно и генетически связаны проявления Cr. В эклогитоподобных породах слюдяногорского комплекса содержатся проявления метаморфогенного Ti (Зылева и др., 2014).

Отдельно для этой зоны можно выделить вторую фазу габбро-гранодиорит-гранитового юньягинского комплекса, с которым генетически связаны золотосодержащие скарново-магнетитовые месторождения и рудопроявления, локализованные в одноименном рудном узле. Юньягинское месторождение в настоящее время представляет промышленный интерес. Помимо данного объекта рудный узел вмещает ряд рудопроявлений и пунктов минерализации Cu-Fe-рудной скарновой с Au, Ti-Fe-рудной мафитовой (волковский тип), Ti-Fe-рудной ультрамафит-мафитовой (качканарский тип) и Ti-Fe-рудной метаморфогенной формаций (Зылева и др., 2014; Andreichev et al., 2017).

Месторождение Юньягинское расположено в 10 км восточнее железнодорожной ветки Обская–Бованенково. Другие известные перспективные рудопроявления и пункты минерализации изучены гораздо хуже.

Более подробное геологическое описание Щучьинской зоны можно найти в статьях и опубликованных отчетах (Зылева и др., 2014; Ремизов и др., 2014; Andreichev et al., 2017; Соболев и др., 2018; Душин, 2020; Пучков, Иванов, 2020 и др.).

Войкарская зона имеет субмеридиональное ССВ простирание и представляет собой ряд аллохтонов, полого погружающихся в ВЮВ направлении. Зона существенно тектонизирована и разбита надвигами на отдельные пластины. Аллохтоны состоят из вулканогенных и терригенно-вулканоген-

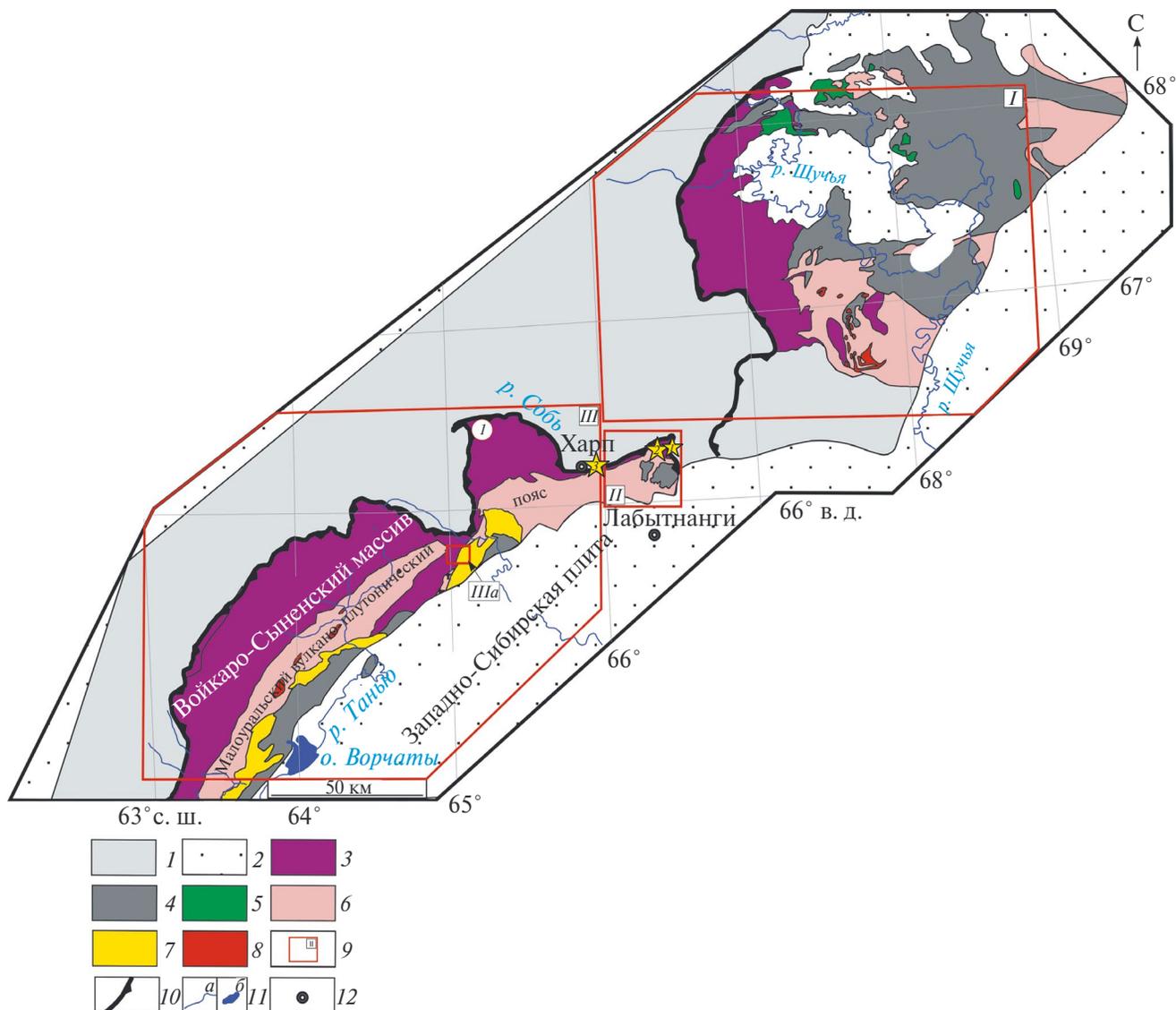


Рис. 1. Тектоническая схема Уральского складчатого пояса (по Государственная..., 2007): 1 – позднекембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской структурной мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–9 – Восточно-Уральская мегазона: 3 – ордовикские метаморфизованные гипербазиты и габброиды; 4 – ордовикско-девонские вулканические и вулканогенно-осадочные образования; 5 – средне-позднеордовикские габброиды и плагиогранитоиды хойпейского комплекса; 6 – ранне-среднедевонские диориты и гранитоиды юньягинского и собского комплексов; 7 – ранне-среднедевонские габброиды, диориты и монцитониты конгорского комплекса; 8 – средне-позднедевонские гранитоиды юрменекского и янослорского комплексов; 9 – границы изучаемых территорий: Щучинская зона (I), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район (II), центральная часть Малоуральской зоны (III), Манюкую-Ворчатинский рудный узел (IIIa); 10 – ГУР; 11 – основные реки и озеро; 12 – города. Желтыми звездочками показаны: месторождения Новогоднее-Монто (1), Петропавловское (2) и рудопоявление Амфиболитовое (3), цифрой 1 показан массив Рай-Из.

ных пород палеозойского возраста океанического и надсубдукционного происхождения. Подошва аллохтонов (в западной части Войкарской зоны) ограничена ГУР. Восточная часть зоны сложена ранне-среднепалеозойскими и позднекембрийскими блоками в различной степени метаморфизованных ультраосновных и основных пород офиолитовой ассоциации. Эти блоки слагают горные

массивы Рай-Из и Войкаро-Сынинский в осевой части Уральского хребта (см. рис. 1). Восточнее ГУР расположены девонские надсубдукционные плутонические, гипабиссальные, а также ассоциирующие с ними преимущественно вулканические и вулканогенно-осадочные образования (D_3-S_2) Восточной подзоны (Малоуральская зона) (Ремизов и др., 2014).

Малоуральская зона в среднем палеозое (O_3-C_1) представляла собой либо островную дугу (O_3-D_1), сменившуюся в раннем девоне окраинно-континентальным вулканоплутоническим поясом (Язева, Бочкарев, 1984), либо островную дугу, сформированную на гетерогенном основании (Кузнецов и др., 2000). На севере и западе Войкарской подзоны массивы Войкаро-Сыннинский и Рай-Из обрамлены с юга и востока полосой габбро-амфиболитов. На востоке расположены ордовикско-девонские островодужные плутонические и осадочно-вулканические комплексы, объединенные в Малоуральскую подзону. На востоке Малоуральской подзоны выходят на поверхность вулканические толщи (O_3-D_2) с тонкими прослоями осадочных пород, прорванными интрузиями разного состава (от габбро до гранитоидов) (Государственная..., 2007). Эти вулканические толщи являются частью палеозойской островодужной системы Полярного Урала, которая в эйфеле и вплоть до пермского столкновения с Восточно-Европейским континентом развивалась, скорее всего, как зрелая островная дуга (Estrada et al., 2012; Викентьев и др., 2017).

Тоупугол-Ханмейшорский рудный район локализован на СВ-окончании Малоуральского вулканоплутонического пояса и представляет собой локальное вулканотектоническое поднятие, осложняющее вулканотектоническую депрессию, и приурочено к пересечению зон разрывов субмеридионального, СВ и СЗ-простираций, которые ограничивают его и контролируют позицию золоторудных месторождений и проявлений. Разломы СВ-простираения обуславливают блоковое строение рудного района и определяют позицию интрузивных тел, даек и апофиз Собского плутона. Все образования района прорваны дайками и силлами габбро-долеритов и лампрофиров малоханмейского комплекса (C_1). Здесь известны два месторождения: Петропавловское (Au-порфиоровое) и Новогоднее-Монто (Au-Fe-скарновое) (см. рис. 1), а также ряд рудопроявлений – Западное, Караченцева, Карьерное и др. (рис. 3) – Fe-Au-скарнового, золото-кварцевого и золото-порфиорового типов (Викентьев и др., 2017).

Манюкую-Ворчатинский рудный узел состоит из вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород малоуральской свиты ($S_2-D_{3k_2}$), прорванных интрузивными образованиями собского и конгорского комплексов. Свита характеризуется фациальной невыдержанностью и сложена разнообломочными туфами и туффитами пироксен-плагиоклазовых андезибазальтов с потоками базальтов и андезибазальтов, прослоями туффитов и туфопесчаников. Изредка встречаются биогермы, сложенные рифогенными известняками (Шишкин и др., 2009;

Кременецкий и др., 2012). В целом петрогеохимический состав и петрографические особенности вулканических и туфогенных пород свиты указывают на то, что они произошли в результате эксплозивной деятельности вулканов центрального типа в палеогеодинамической обстановке субдукционной стадии (Шишкин и др., 2009). Чередование в разрезе пачек вулканогенных и осадочных пород указывает на периодическую активизацию вулканической деятельности в период накопления пород свиты.

Интрузивные комплексы включают образования собского (D_{1-2k}) и конгорского (D_3-C_{1k}) комплексов. Собский комплекс состоит из крупных интрузивов габбро, диоритов и тоналитов, обрамляющих полосу вулканитов с запада. К конгорскому комплексу отнесены небольшие интрузивы и дайковые образования, встречающиеся среди полей вулканитов: габбро, габбро-диориты, диориты, монцодиориты (Шишкин и др., 2009).

Здесь выявлены разнообразные объекты с железорудной минерализацией. Наиболее перспективные – контактово-метасоматический (скарновый), гидротермально-осадочный, магматический, Ti-магнетитовый типы (Первая и Третья Рудные Горки). Также встречаются немногочисленные проявления Ti и Mo минерализации. Кроме того, широко проявлены Cu оруденения, которые представлены как собственно меднорудными, так и комплексными объектами, где Cu ассоциирует с Pb и Zn, Ag, Au, Mo и другими металлами (проявления Янаслорское, Элькошорское, Мокрый Лог, Осеннее и др.).

Более подробное геологическое строение центральной части Малоуральской зоны и Тоупугол-Ханмейшорского рудного района можно найти в опубликованных отчетах (Галлиулин и др., 2005; Перминов и др., 2009 и др.; Бутаков и др., 2012; Кременецкий, 2012; Зылева и др., 2014; Ремизов и др., 2014 и др.) и работах (Черняев и др., 2005; Кениг, Бутаков, 2013; Викентьев и др., 2017).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Получены безоблачные дневные сцены КА Landsat 8:

Щучинская зона: LC08_L1TP_165012_20161001_20170320_01_T1 (01.10.2016 г.) и LC08_L1TP_165013_20161001_20170320_01_T1 (01.10.2016 г.); Тоупугол-Ханмейшорский рудный район: LC08_L1TP_165013_20161001_20170320_01_T1 (01.10.2016 г.); центральная часть Малоуральской зоны: LC08_L1TP_166013_20160821_20170322_01_T1 (21.08.2016 г.).

Изображения взяты из информационной системы сбора и предоставления спутниковых данных ДЗЗ (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov>).

Геологическая информация для изучаемых площадей представлена в виде геологических карт дочетвертичных образований и карт ПИ (масштабы карт 1:1000000, листы Q-41 и Q-42), которые составлены в рамках госзадания Института Карпинского в 2007 и 2014 гг. (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Линеаменты – это прямые или приблизительно линейные формы рельефа, которые широко распространены на поверхности Земли и тесно связаны с подземными скрытыми и поверхностными структурными элементами каркаса разрывных нарушений. Ориентировка и количество линеаментов отражают характер трещиноватости массивов горных пород и могут нести ценную информацию о геологических структурах, тектонике и локализации ПИ (например, Ekneligoda, Henkel, 2010; Masoud, Koike, 2011).

Линеаментный анализ широко используется для структурных исследований (Thannoun, 2013; Миловский и др., 2021; Иванченко и др., 2022), выделения кальдер (Ананьев, 2017; Verdiansyah, 2019), оценки перспектив минерализация (Лесняк и др., 2022; Коротков, 2023) и др.

Методика выделения линеаментов ручным способом на основе КС приведена в работе (Иванова и др., 2020).

С результатами линеаментного и морфоструктурного анализа для изучаемых территорий можно ознакомиться в работах (Викентьев и др., 2021; Иванова, Нафигин, 2023; Иванова, 2024).

Минералы невозможно идентифицировать непосредственно по КС, но могут быть выявлены поля метасоматически-измененных пород, имеющих ярко выраженные спектральные характеристики поглощения и отражения, которые фиксируются в диапазоне датчика КА ДЗЗ. Поэтому для картирования минералов гидротермальных изменений и литологических единиц (Mauger, 2013; Коротков, 2023) широко используется метод соотношения полос (band ratios). Данный метод усиливает спектральные особенности пикселей изображений на основе вычисления отношения спектрального отражения одного канала к другому (Mather, 1999). Выбор подобных каналов производится, исходя из отражающей способности искомого минерала. При этом в числителе должен располагаться канал, характеризующий наиболь-

шую отражающую или излучающую способность минерала, а в знаменателе – наименьшую. В результате искомым минерал (или их группа) будет выражен яркими пикселями на полученном изображении.

Для картирования полей развития гидротермальных минералов с использованием спектральных каналов КА Landsat-8 разработано несколько минералогических индексов (Pouq et al., 2018): 4/2 – минералы группы оксидов и гидроксидов железа (гематит, магнетит, гетит, ильменит), а также ярозит и их смесь – лимонит; 6/4 – минеральные ассоциации с преобладанием оксида двухвалентного железа (магнетита); 6/5 – минеральные ассоциации с преобладанием оксида трехвалентного железа (гематита); 6/7 – гидроксилсодержащие (Al-OH и Fe, Mg-OH), карбонатные (кальцит и доломит) и сульфатные (гипс) минералы. Эти индексы рассматриваются как весомые показатели (индикаторы) Fe³⁺, Fe²⁺, Al/Fe-OH, Mg-Fe-OH и Si-OH групп минералов гидротермальной природы и продуктов их гипергенеза.

Метод главных компонент (МГК) – это многомерный статистический метод, который позволяет выбирать некоррелированные линейные комбинации (нагрузки собственного вектора) переменных так, что каждый извлеченный компонент имеет наименьшую дисперсию. Более подробную информацию о методе можно найти в работах (Jolliffe, 2002; Jensen, 2005; Cheng et al., 2006; Gupta, 2017). Первая главная компонента (PC1) используется для извлечения структурной информации из изображения, так как она характеризуется наибольшей дисперсией в пространстве всех признаков (Jolliffe, 2002).

МГК преобразует набор коррелированных данных в некоррелированные линейные данные. МГК широко используется для картирования гидротермальных минералов и литологических единиц на основе спектральных каналов-сенсоров КА ДЗЗ (Loughlin, 1991). Данный метод применен к анализу ранее полученных минералогических индексов с использованием ковариационной матрицы. Подобный подход позволяет статистически оценить надежность пространственного распределения соответствующих вторичных минералов в исследуемом районе.

В качестве входных данных для МГК традиционно выступают спектральные каналы КС, но для наиболее эффективной статистической оценки надежности пространственного распределения соответствующих гидротермальных минералов в исследуемом районе использованы результаты оценки минералогических индексов с применением ковариационной матрицы.

Систематизация и обобщение данных выполнены в программной среде QGIS. Все имеющиеся данные собраны и визуализированы в едином ГИС-проекте.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой территории при анализе КС были выделены 4 типа гидротермальных изменений, представленных преимущественно разными группами минералов и отдельно показанных на рис. 2, 3, 5.

Для территории Щучинской зоны распределения оксидов двух- и трехвалентного железа, особенно с высоким содержанием, в целом совпадают. При этом наибольшее скопление средних и высоких концентраций локализовано на севере, западе и юге территории. В меньшей степени совпадает расположение повышенных значений гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов, и оксидов, и гидроксидов железа (лимонит) (см. рис. 2).

Это можно объяснить наличием перекрывающих толщ в виде более поздних осадочных комплексов (например, яны-маньинской, тольинской, теунтойской и лаборовской свит), которые представлены разнообразными осадочными породами (пески, гравийники, галечники, конгломераты, пласты бурых углей, алевролиты, песчаники, углестые глины, глины) мощностью до 450 м.

Кроме того, минералы оксидов двух- и трехвалентного железа в рудах месторождения Юньягинское образуют сложные сростания (пойкилитовые, миремкитоподобные) как с рудными (в том числе гематитом и пиритом), так и нерудными минералами (Зылева и др., 2014).

Исследователями Института Карпинского (Зылева и др., 2014) на этой площади были выделены зоны березитоподобных метасоматитов, к которым принадлежат объекты Mo, Au, Au-Fe и Pb-Zn минерализации (см. рис. 2).

Данные зоны слабо отражаются в полученных дистанционных результатах, что обусловлено также большой толщиной четвертичных отложений. В местах, где отложения сокращаются в мощности, наблюдается их совпадение (горные области).

Основными факторами, контролирующими размещение Mo минерализации на территории Щучинской зоны, являются магматический (рудогенерирующие кислые интрузии доордовикских комплексов) и гидротермально-метасоматический (рудоносные и рудовмещающие грейзены, жильные штокверки).

Большинство железорудных объектов (Cu-Fe-рудная скарновая (Au-содержащая) формация)

относится к двум генетическим типам: магматическому и контактово-метасоматическому. Для обоих главным рудоконтролирующим фактором является также магматический. Основные интрузивы — одновременно рудогенерирующими и рудовмещающими. Кислые плутониты (D_{1-2}) обеспечивают скарнообразование, локализующееся исключительно в осадочно-вулканогенных толщах силура, которые прорываются гранитоидами собского и юньягинского комплексов. Кроме того, золоторудная минерализация, содержащаяся в скарново-магнетитовых месторождениях и рудопроявлениях, генетически связана с габбро и диоритами.

Pb-Zn минерализация локализована на контакте гнейсированных роговообманковых диоритов и аповулканогенных сланцев. Выделяется “мраморно-лептитовый горизонт” с парагенезисом минералов, близким к скарнам; по последним развиваются более поздние березиты (Зылева и др., 2014).

В Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе наиболее высокими концентрациями индекса оксида железа (III) выделяется участок с известными золоторудными месторождениями Петропавловское и Новогоднее-Монто (см. рис. 3).

На вулканические породы среднего и основного состава (базальты, андезибазальты, реже андезиты) тоупугольской толщи наложены продукты зачастую совмещенных в пространстве разновозрастных процессов скарнирования, березитизации и окварцевания. Эти метасоматические проявления связаны с дайками кварцевых монцодиорит-порфиритов и кварцевых габбро конгорского комплекса первой и второй фаз внедрения (D_{2kn1} , D_{2kn2}), а также пропилитизацией, которой подверглись плагиограниты и другие гранитоиды поздней фазы собского комплекса (D_{2s}). С зонами пропилитизации связано развитие мелкой вкрапленности сульфидов Cu и Fe, по которым в зоне гипергенеза развиваются продукты окисления сульфидов (Викентьев и др., 2021).

Кроме того, в аншлифах месторождений Новогоднее-Монто и Петропавловское можно также встретить оксиды железа II и III в виде сростаний и разнообразных структур распада (рис. 4).

Исследователями Института Карпинского (Зылева и др., 2014) на этой площади была выделена зона березитоподобных метасоматитов с крутым СВ-падением, которая простирается в СЗ-направлении и прослежена скважинами в Новогодненском рудном поле до глубин 150–250 м с содержанием золота более 1 г/т. Данная зона слабо отражается в полученных дистанционных результатах, что обусловлено большой мощностью четвертичных отложений, которая здесь достигает 93 м (Зылева и др., 2014). В ЮВ-части зоны, где рыхлые отложения хотя и присутствуют, но сокращаются в мощности

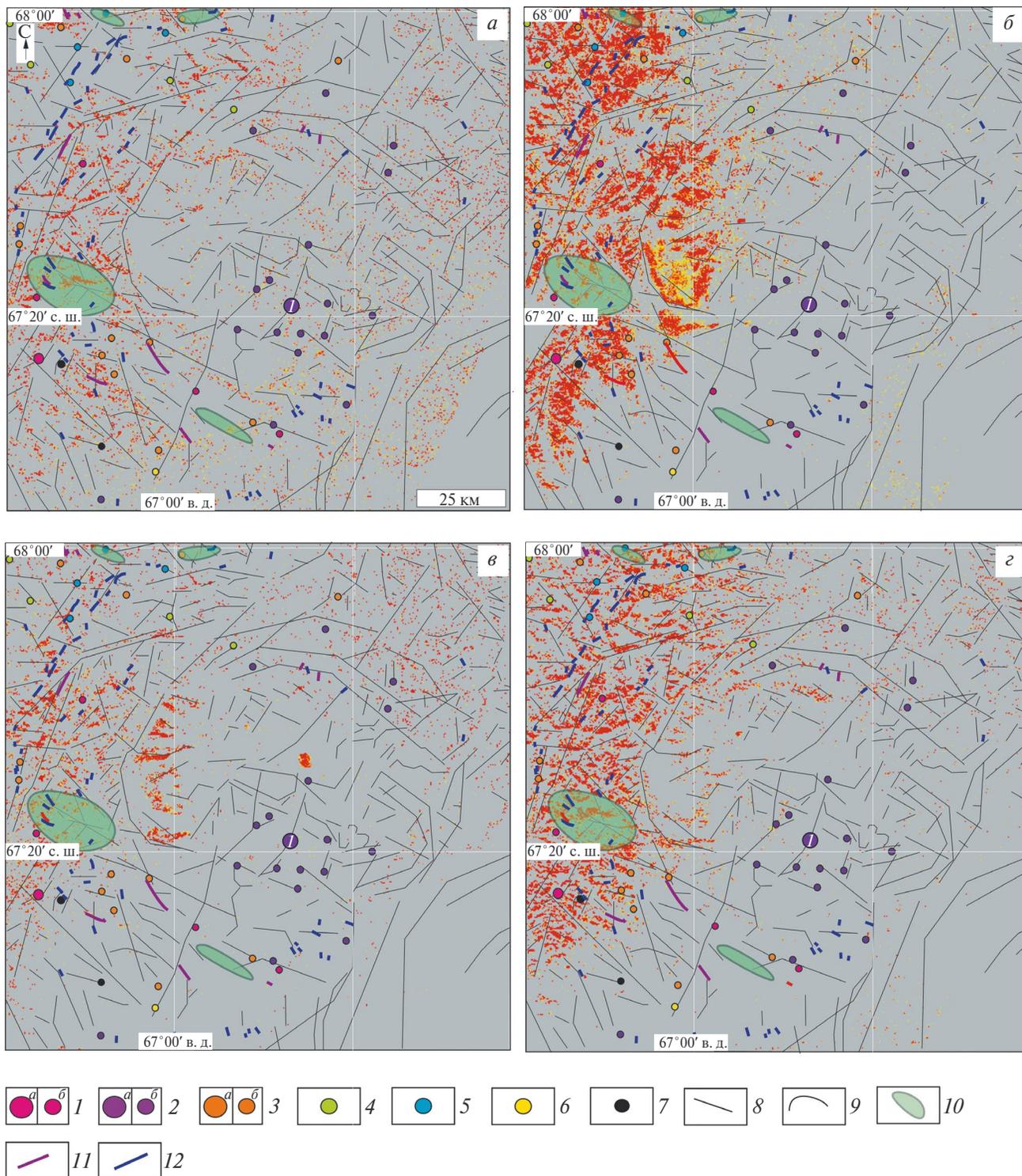


Рис. 2. Схемы развития ассоциаций вторичных минералов для Щучинской зоны, полученные в результате обработки КС КА Landsat 8, с нанесенными на них линияментами, выделенными ручным способом, по КС КА Landsat 8: *а* – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие, *б* – оксиды трехвалентного железа (гематит), *в* – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), *г* – оксиды двухвалентного железа (магнетит). Концентрации индикаторных групп гидротермальных изменений показаны цветными точками: минимальные – желтый цвет, средние – оранжевый и максимальные – красный. 1-7: месторождения (*а*), рудопроявления (*б*): 1 – Mo, 2 – Fe, 3 – Au, Au-Fe, 4 – Cu, 5 – Pb-Zn, 6 – As-Mo-Au, 7 – Ti; 8-9 – радиальные (8) и дуговые (9) линиямента; 10 – зона березитизации; 11-12 – дайки основного (11) и кислого (12) состава, вынесенные с геологической карты (Зылева и др., 2014). Месторождение Юнъягинское обозначено цифрой 1.

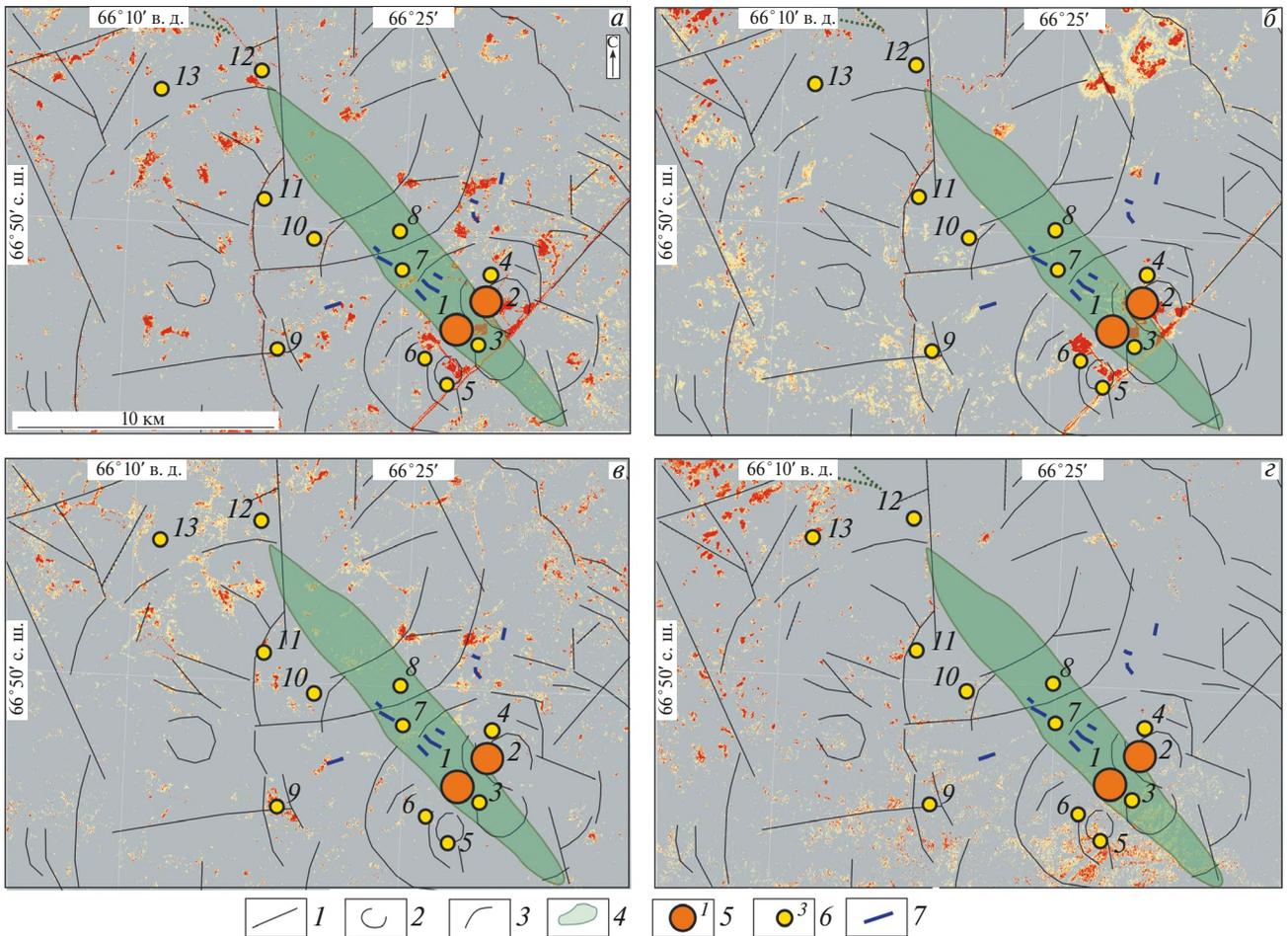


Рис. 3. Карта гидротермальных изменений для Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и прилегающей территории: а–г – схемы преимущественного развития ассоциаций вторичных минералов соответствуют рис. 2; 1–3 – разрывные нарушения, выявленные в ходе анализа КС КА ДЗЗ Landsat 8: 1 – радиальные; 2 – кольцевые; 3 – дуговые; 4 – зона березитизации, вынесенная с геологической карты (Зылева и др., 2014); 5–6 – месторождения и рудопроявления: Петропавловское (1), Новогоднее-Монто (2), Караченцева (3), Тоупугол (4), Карьерное (5), Тоунугольское (6), Аномальное (7), Ханмейшорское (8), Невидимка (9), Обское (10), Малоханмейское (11), Евъеганское (12), Евъюгань (13); 7 – дайки основного состава, вынесенные с геологической карты (Зылева и др., 2014). Концентрации индикаторных групп гидротермальных изменений показаны цветными точками: минимальные – желтый цвет, средние – оранжевый и максимальные – красный.

до 3–6 м, наблюдается их совпадение. Таким образом, можно заключить, что ореолы околорудных изменений, погребенных более чем на 6 м, не находят свое отражение на КС.

Месторождения и рудопроявления на территории центральной части Малоуральской зоны представлены следующей минерализацией: Cu-Zn-Mo, Mo-Cu, Fe-Ti-V-Cu и Au.

К наиболее перспективным объектам с железорудной минерализацией на данной площади относятся контактово-метасоматический (скарновый), гидротермально-осадочный, магматический, Ti-магнетитовый типы. Например, с процессами контактового преобразования связаны проявления скарнового типа Первая и Третья Рудные Горки.

Проявления Ti минерализации генетически делятся на магматические и осадочные типы. В первом – Ti связан с железом и входит в состав титаномагнетита или образует самостоятельную минеральную фазу – ильменит. Как правило, наиболее обогащены титаном породы семейства габбро, где титановые минералы иногда образуют рассеянную вкрапленность и шпирообразные скопления (собский габбро-диорит-тоналитовый комплекс). Кроме того, в титаномагнетитовых проявлениях установлены повышенные содержания V.

Mo минерализация связана с гранитоидами и, вероятно, относится к одному (штокверковому Cu-Mo- или V-Mo-порфировому) геолого-промышленному типу.

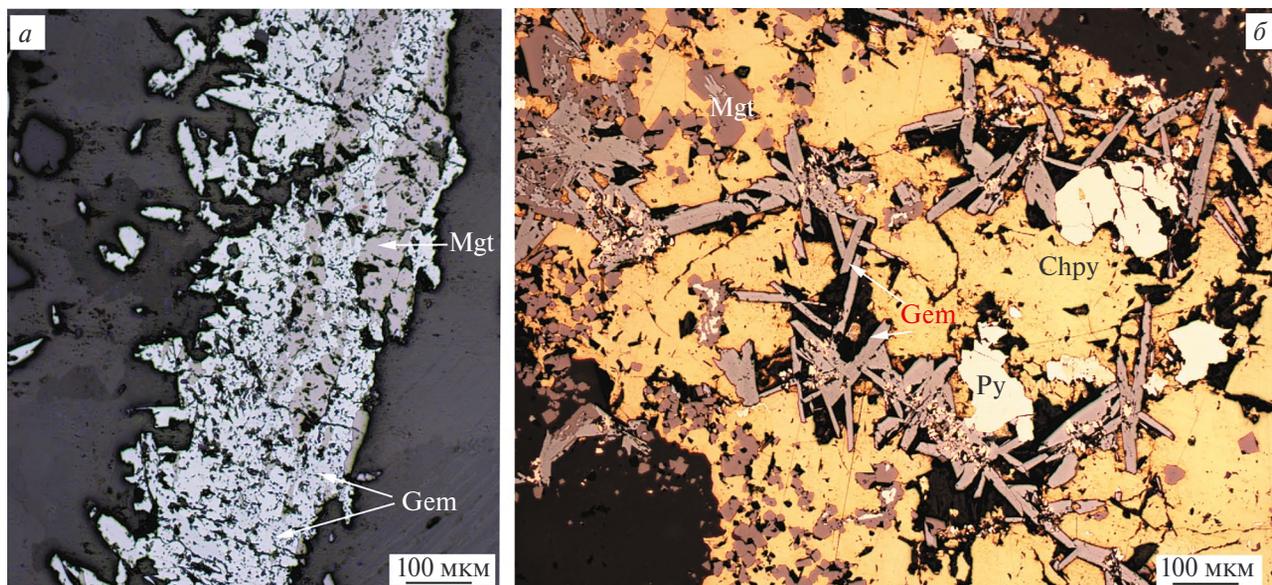


Рис. 4. Структуры распада месторождения Новогоднее-Монто (обр. НМ-4 и НМ-27): аллотриоморфные агрегаты гематита замещают ксеноморфные зерна магнетита в окварцованном скарне (а), неправильные скопления халькопирита замещают разноориентированные игольчатые кристаллы гематита и ксеноморфные зерна магнетита и пирита, локализованные в эпидот-гранат-пироксеновом скарне (б). Условные обозначения: Mgt – магнетит, Py – пирит, Gem – гематит, Chpy – халькопирит.

Сu оруденение на площади листа проявлено очень широко и представлено как собственно меднорудным, так и комплексными объектами, в которых Сu ассоциирует со Pb и Zn, Ag, Au, Mo и другими металлами. Например, оруденение Мо-Сu-порфировой формации развито в пределах Малоуральского вулканоплутонического пояса и представлено проявлениями Янаслорское, Элькошорское, Мокрый Лог и др. Первое из них локализовано в гранитоидах и имеет преимущественно Сu-Мо специализацию. Рудопроявления Мокрый Лог и Осеннее связаны с интрузиями кварцевых мондиоритов конгорского комплекса, прорывающих вулканогенно-осадочные породы малоуральской свиты. В экзоконтактах интрузии проявлены эпидотизация, окварцевание, скарнирование. На отдельных участках рудопроявления Мокрый Лог наблюдается развитие кварц-серпичитовых метасоматитов-филлизитов (березитов). Эти образования сопровождаются интенсивной халькопиритовой минерализацией (содержания Сu до 0.7%).

Кроме того, малоуральская свита, состоящая из вулканогенно-осадочных и осадочных пород, является благоприятной средой для локализации скарно-магнетитового и медно-порфирового оруденения.

Золоторудные объекты парагенетически связаны с интрузиями и ореолами метасоматитов в зонах разломов (Шишкин и др., 2009).

По данным КС КА Landsat 8 распределение оксидов трех- (гематит) и двухвалентного (магнетит) железа, особенно с высоким содержанием, также совпадает и для центральной части Малоуральской зоны, однако средние концентрации трехвалентного железа чуть выше и распределены более равномерно по всей изучаемой площади, чем двухвалентного (рис. 5б, з). Распространение гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих минералов и оксидов и гидроксидов железа (лимонит) отличаются. Последние распределены (высокие и средние концентрации) в основном на ЮВ территории (см. рис. 5).

В аншлифах рудопроявления Амфиболитовое – центральная часть Малоуральской зоны (см. рис. 1) также присутствуют эти оксиды железа II и III совместно в виде разнообразных структур распада (рис. 6) (Иванова, Тюкова, 2022).

Таким образом, в результате анализа и сопоставления площадей выявлены закономерности на золоторудный тип минерализации для восточного склона Полярного Урала:

– изучаемые площади имеют разнообразную рудную специализацию, в том числе золоторудную (Au-сульфидно-Fe-скарновая), где Au является либо единственным полезным компонентом, либо одним из основных ценных элементов (Au содержащие рудные формации: Cu-Fe-скарновая, V-Fe-Cu, Cu-Mo-порфировая и др.). При этом золоторудная минерализация имеет широкий спектр

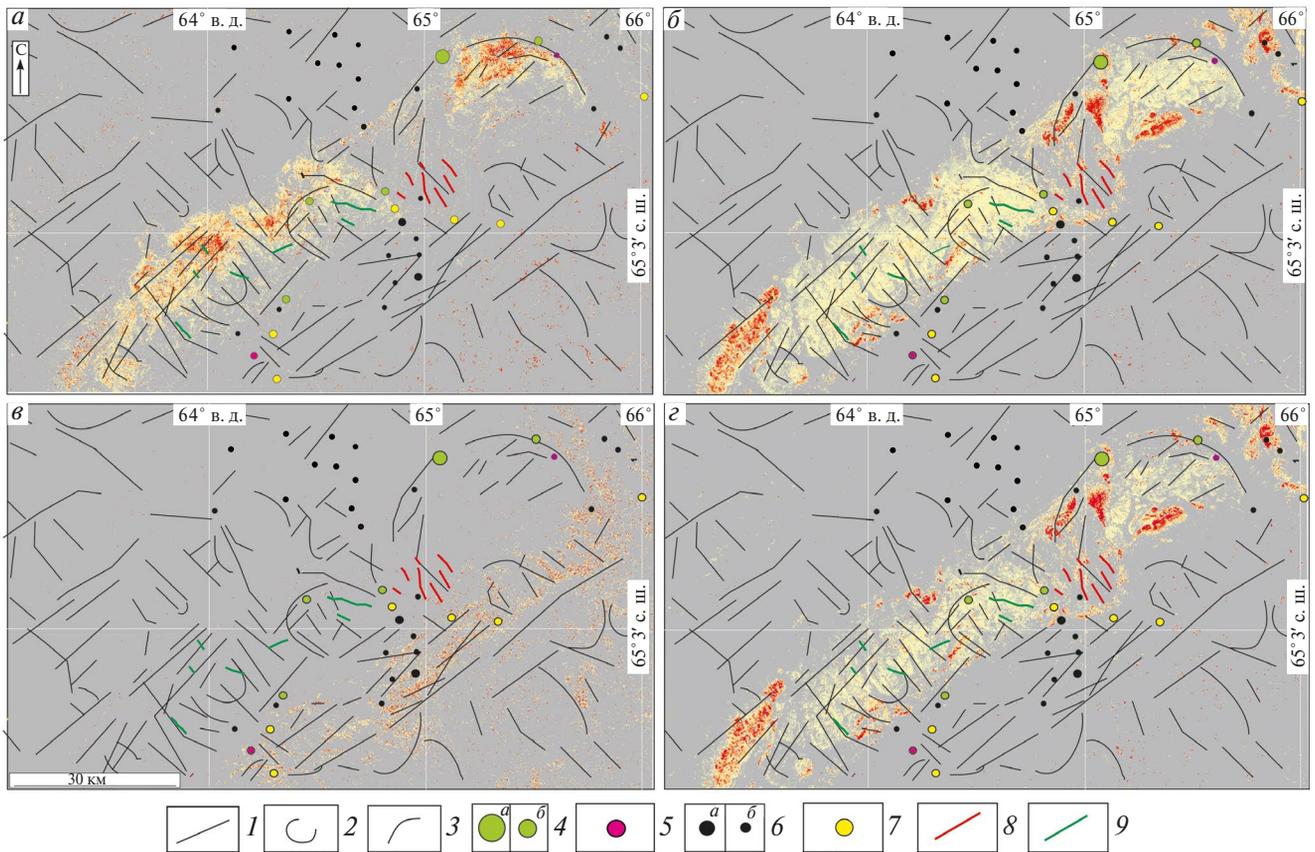


Рис. 5. Карта гидротермальных изменений для центральной части Малоуральской зоны и прилегающей территории, полученная с помощью КС КА ДЗЗ Landsat 8: *а-г* – соответствуют рис. 2; 1–3 – соответствуют рис. 3; 4–7 – месторождения (*а*) и рудопроявления (*б*): 4 – Cu-Zn-Mo, 5 – Mo-Cu, 6 – Fe-Ti-V-Cu, 7 – Au, 8–9 – дайки кислого (8) и основного (9) состава, вынесенные с геологической карты (Шишкин и др., 2009). Концентрации индикаторных групп гидротермальных изменений показаны цветными точками: минимальные – желтый цвет, средние – оранжевый и максимальные – красный.

формационных типов: Au-сульфидно-кварцевых жил и жильных зон, кварц-Au-сульфидных жил, (Cu)-Fe-рудное с золотом скарновое, Cu-порфировое с Au и др.;

– по условиям образования золоторудная минерализация делится на: (1) магматогенно-гидротермальный тип – генетически связан с интрузиями, которые, как правило, были сформированы в эпоху близкую к становлению самих интрузий. (2) Гидротермально-метаморфогенный тип, относящийся к зонам разломов и приуроченный к ореолам метасоматитов;

– железорудная минерализация принадлежит (Cu-Fe-рудная скарновая (золотосодержащая) формация) в основном к магматическому и контактово-метасоматическому генетическим типам (Щучьинская зона и центральная часть Малоуральской зоны);

– вероятно, формирование золоторудных и комплексных месторождений происходило в ре-

зультате развития внутрикоровых гидротермально-метасоматических систем, концентрирующих рудную минерализацию. В результате при распаде таких систем в верхних слоях земной коры возникали преимущественно непротяженные по вертикали (не более 2 км) и небольшие по объемам прерывистые колонны рудных тел (Ананьев, 2017);

– метасоматический ореол проявлен на значительной площади (более 30 км²). На территориях, где из-за наличия перекрывающих толщ, либо более поздних осадочных комплексов, либо экранирующего слоя менее проницаемых вулканических пород метасоматический ореол проявлен и на более меньшей площади (до 10 км²) (Левочская и др., 2021; Gray, Coolbaugh, 1994);

– при микроскопическом изучении руд образцов из месторождений и рудопроявлений изучаемых территорий оксиды железа II и III присутствуют в виде разнообразных сростаний и структур распада.

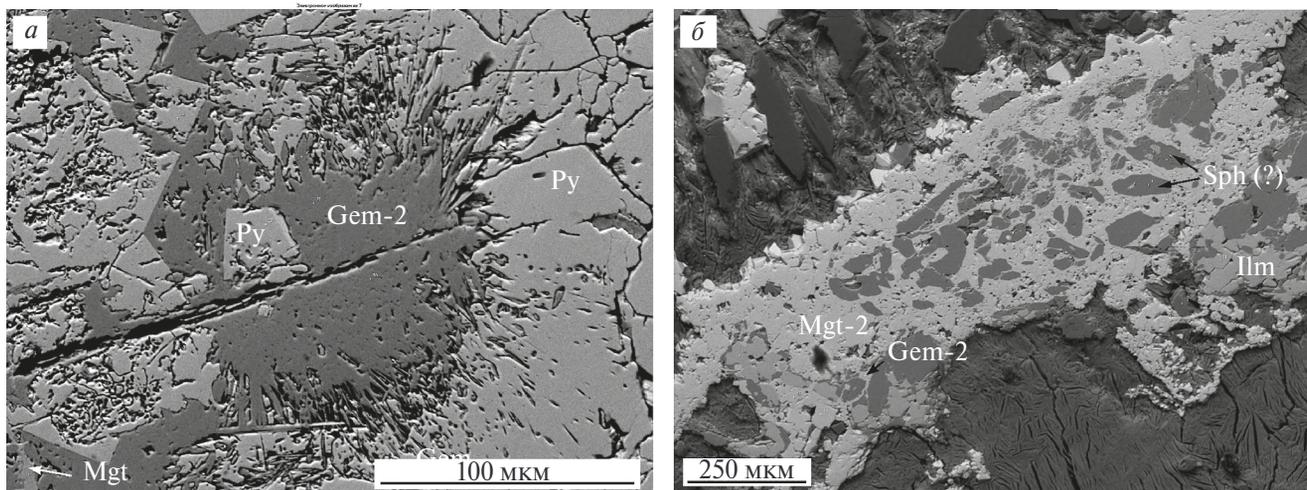


Рис. 6. Структуры распада рудопоявления Амфиболитовое (обр. А-973): радиально-лучистый агрегат (волокнистая структура) гематита-2, сосредоточенный в катакlastическом изъеденном пирите, локализованном в пироксени-те (?) (а), петельчатая структура, представленная ксеноморфным магнетитом, окаймляющим овальные включения сфена (?), ксеноморфные включения гематита и ильменита до 200 мкм локализованы также в магнетите, но по краям структуры (б). Условные обозначения: Mgt – магнетит, Py – пирит, Gem – гематит, Sph – сфен, Ilm – ильменит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки данных КА ДЗЗ Landsat 8 построены карты распространения гидро-термальных изменений для территории Щучинской зоны, Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и центральной части Малоуральской зоны: гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие породы, оксиды двух- (магнетит) и трехвалентного железа (гематит), оксиды и гидроксиды железа (лимонит), – с использованием спектральных каналов КА ДЗЗ Landsat 8 (минералогические индексы) и МГК.

На основании полученных в ходе исследования результатов можно сделать вывод, что на площадях, перспективных на золоторудную минерализацию для восточного склона Полярного Урала, должны быть локализованы интрузии основного состава, с которыми генетически связана золоторудная минерализация, и проявлены метасоматические ореолы значительной площади (более 30 км²) с повышенными значениями индексов оксида железа (III) и оксида железа (II), и в меньшей степени – оксиды и гидроксиды железа (лимонит), а также гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке молодежной лаборатории ИГЕМ РАН “Лаборатория прогнозно-металлогенетических исследований” в рамках темы государственного задания “Применение со-

временных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьев Ю.С.* Золото-концентрирующие системы Южного складчатого обрамления Западно-Сибирской плиты (на примере Западной Калбы). Дис. ... док.геол.-минер. наук. Томск, 2017. 509 с.
- Бутаков К.В., Гандулкадыров М.М., Шамсутдинова Р.Р.* Оценочные работы на золотое оруденение в пределах Тоупугол-Ханмейшорской площади. Отчет о результатах работ за 2010–2012 гг. Результаты оценочных работ в пределах Тоупугол-Ханмейшорской площади. Лабитнанги, 2012. 126 с.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др.* Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования Геология руд. месторождений // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др.* Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования Геология руд. месторождений // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.
- Галиуллин И.З., Перминов И.Г., Коновалов Ю.И. и др.* Специализированные геохимические поиски на благородные и редкие металлы в пределах Западно-Харьбейской площади за 2004–2005 гг., Лабитнанги, 2005.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (3-е поколение). Уральская серия. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.

- Душин В.А.* Геологическое строение и магматизм Шучинского мегаблока (Полярный Урал) // Известия УГГУ. 2020. Вып. 4(60). С. 35–56.
- Зылёва Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П., Жданов А и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И.* Структурный контроль золоторудной минерализации восточного склона Полярного Урала по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 60–73.
- Иванова Ю.Н., Нафигин И.О.* Применение набора данных Landsat-8 и цифровой модели рельефа SRTM для прогнозирования золото-полиметаллической минерализации на территории центральной части Малоуральской зоны, Полярный Урал // Исследования Земли из космоса. 2023. № 6. С. 20–34.
- Иванова Ю.Н., Тюкова Э.Е.* Структуры распада в рудах проявления Амфиболитовое (Полярный Урал) // II науч. конф. “Геология континентальной окраины”. Владивосток, 2022. С. 143–145.
- Иванова Ю.Н.* Прогнозирование перспективных площадей на золоторудный тип минерализации на основе интеграции геологической, геофизической информации и обработки набора данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2 для территории северного окончания восточного склона Полярного Урала // Исследования Земли из космоса. 2024 (в печати).
- Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Черемных А.В.* Некоторые возможности линеаментного анализа при картировании разноранговых разломов (на примере Прибайкалья) // Исследование Земли из космоса. 2022. № 3. С. 66–83.
- Кениг В.В., Бутаков К.В.* Месторождения рудного золота Новогоднее-Монто и Петропавловское – новый золоторудный район на Полярном Урале // Разведка и охрана недр. 2013. № 11. С. 22–24.
- Коротков В.В.* Геохимические и другие технологии, методы и методики при прогнозировании и поисках месторождений (преимущественно “скрытого” типа) // ФГБУ “ВИМС”, 2023. 166 с.
- Кременецкий А.А.* Обоснование поисковых и поисково-реvisionsных работ на рудное золото в пределах Манюкую-Варчатинского рудного узла (рудопоявления: Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное). Масштаб 1:10000. М.: ФГУП ИМГРЭ. 2012. 45 с.
- Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В.* Палеозойская эволюция Полярного Урала: Войкарский бассейн с корой океанического типа существовал не менее 65 млн лет // Бюлл. МОИП, отд. геол. 2014. Т. 89. Вып. 5. С. 56–70.
- Левочская Д.В., Якич Т.Ю., Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С.* Гидротермально-метасоматическая зональность, флюидный режим и типы золотого оруденения участков Эми и Елена эпитеpмального рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 333. № 10. С. 17–34.
- Лесняк Д.В., Ананьев Ю.С., Гаврилов Р.Ю.* Структурные, геофизические и геохимические критерии эпитеpмального кислотно-сульфатного золотого оруденения на примере рудного поля Светлое (Хабаровский край) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 60–72.
- Миловский Г.А., Ишмухаметова В.Т., Апарина А.Д.* Применение космической съемки высокого разрешения при поисках прибрежных россыпей и месторождений углеводородов в северных морях России // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 74–82.
- Прямоносков А.П., Степанов А.Е., Телегина Т.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000 (издание второе). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XII. Объяснительная записка. Салехард: Комитет природных ресурсов по Ямало-Ненецкому автономному округу, 2001. 231 с.
- Пучков В.Н., Иванов К.С.* Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития // Геотектон. 2020. № 1. С. 41–61.
- Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 (2-е изд., циф.). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XVI (г. Хордьюс). Объяс. зап. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоротина О.В. и др.* Девонский островодковый магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.
- Черняев Е.В., Черняева Е.И., Седельникова А.Ю.* Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал) // Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...). Мат. конф. XI Чтения А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2005. С. 131–137.
- Шишкин В.А., Жигалов С.В., Грищенко Ш.Г.* Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:200 000 (новая серия). Лист P-55-XII. Объяснительная записка. СПб.: 2008.
- Язева Р.Г., Бочкарев В.В.* Войкарский вулcano-плутонический пояс (Полярный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 156 с.
- Andreichev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A.* Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // Doklady Earth Sciences. 2017. Т. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmanna U.M., Koller V.F.* ESA and the Arctic - The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // Acta Astronautica. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Cheng Q., Jing L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // Intern. Jour.of Rem. Sen. 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
- Di Tommaso I., Rubinstein N.* Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // Ore Geol. Rev. 2007. V. 32. P. 275–290.
- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // Jour. of Comp.and Geos. 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.P., Roland N.W., Schäfer F., Khain E.V., Remizov D.N.* Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar massif, Polar Urals // Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft. 2012. V. 163. № 1. P. 9–42.
- Graham G.E., Kokaly R.F., Kelley K.D. et al.* Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range // Econ. Geol. 2018. V. 113 (2). P. 489–510. DOI: 10.5382/econgeo.2018.4559.
- Gray J.E., Coolbaugh M.F.* Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // Economic Geology. 1994. V. 89. P. 1906–1923.

- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd ed., 2005. P. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe I.T.* Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, UK, 2-d edition., 2002. 487 p.
- Loughlin W.P.* Principal Component Analysis for Alteration Mapping // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1991. V. 57 P. 1163–1169.
- Masek J.G., Claverie J., Ju. M., and et al.* Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- Masoud A.A., Koike K.* Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // Tectonophysics. 2011. 510(3). P. 291–308.
- Mather P.M.* Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.
- Maurer T.* How to pan-sharpen images using the gram-Schmidt pan-sharpen method—a recipe. In: International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XL-1/W1. ISPRS Hannover workshop, Hannover, pp 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79:101.
- Pour B.A., Hashim M.* The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // Ore Geology Review. 2012. V. 44. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., et al.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // Polar Sci. 2018. № 16. P. 23–46.
- Thannoun R.G.* Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin. 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319-7463.
- Verdiansyah O.* A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // Indonesian Journ. of Geography. 2019. 51, 1. P. 31–41.
- Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B.* Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 46–56.
- Vermote E.F., Kotchenova S.* Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. V. 113(D23).
- Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // J. Photogram. and Rem. Sens. 2007. V. 62. P. 271–282.

Mapping of Hydrothermal-Metasomatic Alteration for Prediction Gold Mineralization Based on Processing a Dataset of the Landsat 8 Remote Sensing Spacecraft for the Territory of the Eastern Slope of the Polar Urals

J. N. Ivanova^{1,2}

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

²*RUDN University, Moscow, Russia*

Based on satellite imagery from Landsat 8, an analysis was made of the territories of the eastern slope of the Polar Urals that are promising for identifying gold mineralization (from north to south): Shchuchinsky zone (Yunyaginsky deposit), Toupugol-Khanmeishorsky ore district (Novogodnee-Monto and Petropavlovskoye deposits) and the central part of the Malouralsk zone (Manyukuyu-Vorchatinsky ore cluster). The study was carried out with the aim of identifying similar patterns in the distribution of hydrothermal-metasomatic changes in order to develop a forecast and search criterion (material) for the gold ore type of mineralization. It was found that in areas promising for Au mineralization on the eastern slope of the Polar Urals, intrusions of basic composition should be localized, with which gold mineralization is genetically associated and metasomatic halos of a significant area (more than 30 km²) with increased values of iron (III) oxide indices should be localized. And iron (II) oxide, and to a lesser extent – iron oxides and hydroxides (limonite), as well as hydroxyl-(Al-OH, Mg-OH) and carbonate-containing minerals.

Keywords: gold mineralization, lineaments, morphostructures, hydrothermal-metasomatic alteration, the Polar Urals, Landsat 8

REFERENCES

- Ananiev Yu.S.* Gold-concentrating systems of the Southern folded framing of the West Siberian plate (on the example of the Western Kalba). Dis. ... dok.geol.-miner. Sciences. Tomsk, 2017, 509 p. (In Russian).
- Andreichiev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A.* Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // *Doklady Earth Sciences*. 2017. T. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmanna U.M., Koller V.F.* ESA and the Arctic – The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // *Acta Astronautica*. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Cheng Q., Jing, L., Panahi A.* Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement // *Intern. Jour.of Rem. Sen.* 2006. V. 27(16). P. 3387–3401.
- Chernyaev E.V., Chernyaeva E.I., Sedelnikova A.Yu.* Geology of the gold-skarn deposit Novogodnee-Monto (Polar Urals) // Skarns, their genesis and ore content (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...). Mat. conf. XI Readings A.N. Zavaritsky. Yekaterinburg: IGiG UrO RAN, 2005, pp. 131–137.
- Di Tommaso I., Rubinstein N.* Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290.
- Dushin V.A.* Geological structure and magmatism of the Shchuchinsky megablock (Polar Urals) // *News of the USGU*. 2020. Issue. 4(60). P. 35–56. (In Russian).
- Ekneligoda T.C., Henkel H.* Interactive spatial analysis of lineaments // *Jour. of Comp. and Geos.* 2010. V. 36. № 8. P. 1081–1090.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.P., Roland N.W., Schäfer F., Khain E.V., Remizov D.N.* Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar massif, Polar Urals // *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*. 2012. V. 163. № 1. P. 9–42.
- Galiullin I.Z., Perminov I.G., Konovalov Yu.I., et al.* Report on the results of works on completion of the object: “Specialized geochemical prospecting for noble and rare metals in within the West Harbeyskaya area Labytnangi”, 2005.
- Graham G.E., Kokaly R.F., Kelley K.D., et al.* Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range // *Econ. Geol.* 2018. V. 113 (2). P. 489–510. DOI: 10.5382/econ-geo.2018.4559.
- Gray J.E., Coolbaugh M.F.* Geology and geochemistry of Summitville, Colorado: An Epithermal Acid Sulfate Deposit in a Volcanic Dome // *Economic Geology*. 1994. V. 89. P. 1906–1923.
- Gupta R.P.* Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, 2017. P. 180–190, 235–240, and 332–336.
- Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Cheremnykh A.V.* Some possibilities of lineament analysis when mapping faults of different ranks (using the example of the Baikal region) // *Earth Research from Space*. 2022. No. 3. P. 66–83. (In Russian).
- Ivanova J.N., Nafigin I.O.* Application of the Landsat-8 data set and the SRTM digital elevation model to predict gold-base metal mineralization in the central part of the Little Ural zone, Polar Urals // *Earth Research from Space*. 2023. № 6. P. 20–34. (In Russian).
- Ivanova J.N., Tyukova E.E.* Decay structures in the ores of the Amphibolite occurrence (the Polar Urals) // II scientific. conf. “Geology at the Continental Margin”. 2022. P. 143–145. (In Russian).
- Ivanova J.N.* Prediction promising areas for gold ore mineralization based on the integration of geological, geophysical information and processing of the data set of the Earth remote sensing spacecraft Harmonized Landsat Sentinel-2 for the territory of the northern end of the eastern slope of the Polar Urals // *Earth Research from Space*. 2024 (in press). (In Russian).
- Jensen J.R.* Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective // Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458, 3-rd ed., 2005. P. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe I.T.* Principal component analysis. Department of Mathematical Sciences King's College University of Aberdeen, Uk, 2-d edition., 2002. 487 p.
- Kenig V.V., Butakov K.V.* Ore gold deposits the Novogodnee-Monto and the Petropavlovskoye are a new gold ore region in the Polar Urals // *Razvedka i okhrana nedr.* 2013. № 11. P. 22–24. (In Russian).
- Korotkov V.V.* Geochemical and other technologies, methods and techniques for forecasting and searching for deposits (mainly “hidden” type) // Federal State Budgetary Institution “VIMS”, 2023. 166 p. (In Russian).
- Kremenetsky A.A.* Justification of search and prediction and audit works on gold within the Manukuyu-Varchatinsky ore cluster (the Polyarnaya Nadezhda, the Geokhimicheskoe, and the Blagodatnoye ore occurrence). Scale 1: 10,000. Moscow: FSUC IMGRE. 2012. 45 p. (In Russian).
- Kuznetsov N.B., Udoratina O.V., Andreichiev V.L.* Paleozoic isotope rejuvenation of the pre-Uralide complexes and the problem of the Paleozoic evolution of the eastern margin of the East European continent, *Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser. Geol.* 2000. No. 3(9). P. 15–19. (In Russian).
- Lesnyak D.V., Ananiev Yu.S., Gavrilov R.Yu.* Structural, geophysical and geochemical criteria for epithermal acid-sulfate gold mineralization on the example of the Svetloe ore field (Khabarovsk Territory) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2022. V. 333. No. 8. P. 60–72. (In Russian).
- Levochskaya D.V., Yakich T.Yu., Lesnyak D.V., Ananiev Yu.S.* Hydrothermal-metasomatic zoning, fluid regime and types of gold mineralization in the Emi and Elena sites of the Svetloe epithermal ore field (Khabarovsk Territory) // *Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2021. V. 333. No. 10. P. 17–34. (In Russian).
- Loughlin W.P.* Principal Component Analysis for Alteration Mapping // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 1991. V. 57. P. 1163–1169.
- Masek J.G., Claverie J., Ju. M. et al.* Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018.
- Masoud A.A., Koike K.* Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt // *Tectonophysics*. 2011. 510(3). P. 291–308.
- Mather P.M.* Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction. Chichester, UK: John Wiley and Sons. 1999. 460 p.

- Maurer T.* How to pan-sharpen images using the gram-Schmidt pan-sharpen method—a recipe. In: International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, volume XL-1/W1. ISPRS Hannover workshop, Hannover, pp 21–2. Environmental Earth Sciences. 2013. 79:101.
- Milovsky G.A., Denisova E.A., Yezhov A.A., Kalenkovich N.S.* Astring mineralization in the Sob'-Kharbey area (the Polar Urals) from Geospatial data // The study of the Earth from space. 2007. No. 6. P. 29–36. (In Russian).
- Perminov I.G., Grigoriev V.V., Kozlitin V.I. et al.* Prospecting and prospecting works for ore gold within the Sob-Kharbeyskaya area (YaNAO). Report on works 2006–2009 according to the State Contract No. 111–143 // Labytnangi, the Polar-Ural State Geological Enterprise, 2009. (In Russian).
- Pour B.A., Hashim M.* The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // Ore Geology Review. 2012. V. 44. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009.
- Pour A.B., Park Y., Park T.S., et al.* Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // Polar Sci. 2018. № 16. P. 23–46.
- Pryamonosov A.P., Stepanov A.E., and et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (second edition). The Polar Ural series. Q-41-XII Sheet. Explanatory note. Salekhard: natural resources committee for the Yamalo-Nenets autonomous district. 2001. 231 p. (In Russian).
- Puchkov V.N., Ivanov K.S.* Tectonics of the northern Urals and Western Siberia: general history of development // Geotecton. 2020. No. 1. P. 41–61. (In Russian).
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I., et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (2nd edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus). Explanatory letter. Saint Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2014, 256 p. (In Russian).
- Shishkin M.A., Astapov A.P., Kabatov N.V., et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1000000 (3rd gen.). The Ural series. Q41 – Vorkuta sheet: Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007. 541 p. (In Russian).
- Sobolev I.D., Soboleva A.A., Udoratina O.V., et al.* Devonian island-arc magmatism of the Voikar zone in the Polar Urals // Geotectonics. 2018. V. 52. No. 5. P. 531–563.
- Thannoun R.G.* Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS // Intern. Jour. of enhanced Res. in Scien. Techn. & Engin. 2013. 2, 2. ISSN NO: 2319-7463.
- Verdiansyah O.* A Desktop Study to Determine Mineralization Using Lineament Density Analysis at Kulon Progo Mountains, Yogyakarta and Central Java Province. Indonesia // Indonesian Journ. of Geography. 2019. 51, 1. P. 31–41.
- Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B.* Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 185. P. 46–56.
- Vermote E.F., Kotchenova S.* Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. V. 113(D23).
- Vikentiev I.V., Mansurov R.Kh., Ivanova Yu.N., and others.* Gold-porphyry Petropavlovskoe deposit (Polar Urals): geological position, mineralogy and conditions of formation Geology of ores. deposits // Geology of ore deposits. 2017. T. 59. No. 6. Pp. 501–541.
- Vikentyev I.V., Ivanova Y.N., Tyukova E.E., et al.* Porphyry-style Petropavlovskoe gold deposit, the Polar Urals: geological position, mineralogy, and formation conditions // Geology of Ore Deposits. 2017. V. 59. № 6. P. 482–520.
- Yazeva R.G., Bochkarev V.V.* Voikar volcano-plutonic belt (Polar Urals). Sverdlovsk: UC AN SSSR, 1984. 156 p. (In Russian).
- Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // J. Photogram. and Rem. Sens. 2007. V. 62. P. 271–282.
- Zylova L.I., Kazak A.P., et al.* State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series West Siberian. Sheet Q-42 – Salekhard: Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI, 2014. 396 p. (In Russian).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ РЕСУРС-П, КАНОПУС-ПСС, ASTER И LANDSAT ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРАН-МОЛИБДЕНОВОГО И ХРОМИТО-ПЛАТИНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ НА ПОЛЯРНОМ УРАЛЕ

© 2025 г. Г. А. Миловский¹, *, А. Д. Апарин¹, А. Р. Ибрагимов¹,
А. А. Кирсанов², К. Л. Липияйнен²

¹Научный геоинформационный центр РАН, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: oregas@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024 г.

Разработаны методы комплексного анализа результатов космической, гравиметрической и магнитометрической съемки для локализации рудоперспективных участков на Полярном Урале в пределах номенклатурных листов R-42, Q-42. При дешифрировании материалов многозональной космической съемки среднего (ASTER, Landsat) и высокого (Канопус-ПСС, Ресурс-П) разрешения выявлены линейные, дуговые и кольцевые структурные элементы, контролирующие локализацию уран-молибденового и хромито-платинового оруденения Полярного Урала. Дешифрирование в различных спектральных ИК-каналах зон метасоматических измененных пород позволило локализовать площади для постановки детальнейших работ. На основе космической съемки высокого разрешения подготовлены крупномасштабные структурно-тектонические схемы и намечены участки детализации для наземных заверочных работ.

Ключевые слова: многозональная космическая съемка, поисковые признаки, месторождения, хром, платина, уран, молибден, Полярный Урал

DOI: 10.31857/S0205961425010055, EDN: DHWCAI

ВВЕДЕНИЕ

Для среднемасштабного дешифрирования применялись материалы многозональной космической съемки Landsat-7 (США) и ASTER (Япония). На их основе выявлены зоны околорудно-измененных пород (березиты, вторичные кварциты, серицит-гидрослюдисто-кварцевые метасоматиты). Дистанционные основы поисковых площадей подготовлены на основе многозональной космической съемки Ресурс-П (каналы 10, 21, 22, 23, 33) и панхроматической съемки Канопус-ПСС с разрешением на местности 1–3 м.

На основе этих материалов выполнено космодешифрирование и проведен линеаментный анализ геологических структур. Дешифрирование локальных вулканогенных структур, метасоматических пород и субвулканических образований позволило на основе данных космосъемки наметить площади, рекомендуемые для наземной заверки.

Методические приемы прогнозирования оруденения на основе дистанционных методов включа-

ют применение космических данных для дешифрирования структурных элементов (линеаментов), контролирующих пространственное расположение месторождений и рудопоявлений, а также для локализации участков гидротермально-метасоматических пород. Применение ГИС-технологий при изучении пространственного распределения рудных объектов разного уровня позволяет подобрать новые критерии прогноза оруденения. Большие массивы исходных данных, полученных при космической съемке высокого и среднего разрешения, и геолого-геофизические данные обрабатывались с помощью программных средств ArcGIS, ENVI, Adobe Photoshop.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМОДЕШИФРИРОВАНИЯ ПЛОЩАДИ ХАХАРЕМПЭ (УРАН-МОЛИБДЕНОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ)

Площадь Хахаремпэ расположена в западной части листа R-42-XXXI. В строении листа R-42-XXXI

участвуют структурно-вещественные комплексы 3-х структурных этажей: рифейско-раннекембрийского, кембрийско-верхнепалеозойского и мезозойско-кайнозойского, отвечающих соответственно байкальской (кадомской), каледоно-варисской и альпийской эпохам складчатости (Государственная..., 2003). Они характеризуются различным структурным планом, разделены угловыми и азимутальными несогласиями нередко с крупными перерывами в осадконакоплении. Нижний структурный этаж (R-Є₁) сложен метаморфизованными породами очетывисской, лядгейской, сядатинской, арканьрдской свит, для него характерно сложное сочетание палеовулканических и дисплекатных структурных элементов. Средний структурный этаж (Є₃-P₁) сложен метаморфизованными (зеленосланцево-зеленокаменная фация) осадочными, вулканогенно-осадочными рифтогенными, шельфовыми и склоновыми комплексами палеозоя в сочетании с дизъюнктивными и дисплекатными структурами. Верхний структурный этаж (Mz-Kz) представлен слабо литифицированными и рыхлыми осадочными формациями морского и континентального типов, осложненных процессами внутриплитной активизации. Главными структурами фундамента являются Оченьрдский и Лекынтальбейский блоки (рис. 1). Внутреннее строение Оченьрдского блока определяется системой палеовулканических структур центрального и линейного типов (Лядгейский, Мунтысяпейский, Кызыгейский, Хахаремский палеовулканы), осложненных сериями палеократеров (Тизнезашорский, Малая Кальдера-Пэ, Восточнокызыгейский и др.) в сочетании с шельфово-молассоидными осадками очетывисской, лядгейской и арканьрдской свит. Последние нередко смяты в изоклиналильные опрокинутые на запад складки с крутым (60–70°) падением крыльев. Палеовулканические структуры, как правило, разбиты сериями кольцевых и радиальных дизъюнктивов и системой более молодых дискордантных северо-западных и субмеридиональных (Нярминский, Кызыгейский сбросо-сдвиги) структур. Восточное крыло Оченьрдского блока осложнено системой субпараллельных надвигов (Верхненярминский, Сангаряхинский), которые характеризуются достаточно крутыми углами падения сместителей. На востоке Оченьрдский блок погружается под литорально-шельфовые комплексы палеозоя, слагающие Саурейскую синклинали, осложненную с востока Саурейяхинской коллизионной зоной.

Структурной особенностью площади является широкое развитие покровно-надвиговых дислокаций, нарушенных системой субвертикальных активизационных структур сбросо-раздвигового типа. Карско-Нярминский паравтохтон, расположенный к северу от Оченьрдского блока, изве-

стен в литературе как “нярминский треугольник”. Он сложен интенсивно дислоцированными карбонатно-углеродистыми отложениями харотской свиты (S-D₁) и со всех сторон ограничен тектоническими нарушениями взбросо-надвигового типа, падающими под углами 70–80°. Карско-Нярминскую структуру и Оченьрдский блок разграничивает Малотальбейский структурный шов. Внутреннее строение шовной зоны весьма сложное: это тектониты, бластомилониты с горизонтами псевдоконгломератов. Последние представляют из себя будинаж-структуры с милонитизацией и развальцеванием наиболее прочных пород.

Саурейяхинский структурный шов ограничивает с запада допалеозойский Лекынтальбейский блок. Его отличительная особенность – насыщенность магматитами: серпентинизированными ультрабазитами, габброидами и долеритами. Протяженность Саурейяхинского шва составляет порядка 50 км. Генеральное простирание северо-восточное 25–30°. Основные швы западного ограничения Саурейяхинской структуры имеют восточное падение (азимут падения 110–120°) под углами 55–60°.

Структурные швы (разломы первого порядка) фиксируются в гравиметрическом поле понижением значений Δg (рис. 2). При интерпретации потенциальных полей (гравитационного и магнитного) и их трансформаций с привлечением данных сейсморазведки (ГСЗ) установлена связь структуры гравитационного поля и, особенно, его локальных составляющих с подъемом дорифейского кристаллического фундамента платформы (Государственная..., 2003). Положительные аномалии магнитного поля фиксируют систему Верхненярминского и Сангаряхинского разломов, Тизнезашорскую палеовулканическую структуру, Комсомольский гипербазитовый массив. Среди разломов второго порядка можно выделить несколько групп, различающихся направлением и формой в плане, временем заложения и морфологией. По направлению различают: северо-западное, субмеридиональное, северо-восточное и субширотное. Разломы северо-западного и северо-восточного направлений были заложены в допалеозойское время. Их отличительная особенность – протяжённость и прямолинейность в плане, секущий характер по отношению к границам структурно-формационных зон и подзон. В плане это, как правило, зоны шириной несколько десятков метров со сложным внутренним строением и морфологией. Древнее заложение имеют, вероятно, и субширотные разломы. Современное тектоническое строение Полярного Урала определено развитием мезозойской блоковой тектоники, наложенной на палеозойские и более древние геологические структуры.

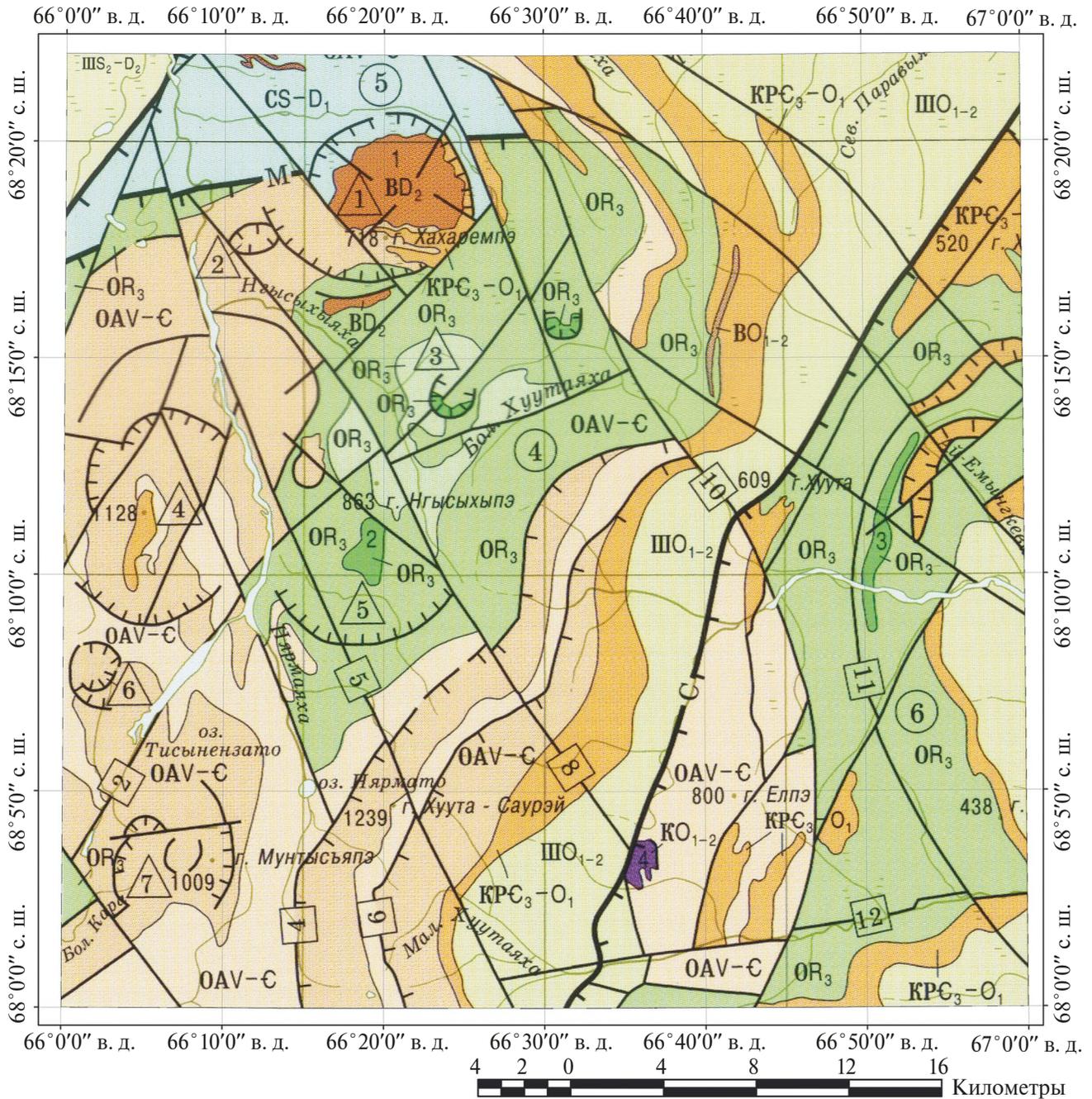


Рис. 1. Тектоническая схема масштаба 1:500000. R-42-XXXI. Условные обозначения на рис. 1а.

На Полярном Урале урановые месторождения известны в западной части северного периклинального замыкания Ляпинского антиклинория и пространственно связаны с полосой развития рифей-кембрийских кислых вулканитов (Машковцев и др., 2010). Месторождения молибден-урановой формации отличаются пространственной и парагенетической связью с комплексами позднеорогенного вулканизма, штокверковым строени-

ем рудных тел и генетической связью оруденения с различными фациями метасоматической формации березитов (Бойцов и др., 2008).

Распределение метасоматических пород на исследуемой площади подчинено линейным разрывным структурам северо-восточного простирания (рис. 3). Наиболее отчетливо метасоматические изменения проявлены в зоне Саурейяхинского структурного шва и Сангаряхинского надвига. Все исследованные

Геодинамические комплексы и слагающие их формации

Геодинамические комплексы Структурные этажи	Внутриплитные			Континентальной окраины		Субдукционные		Коллизионные
	Плитного чехла	Горячих точек	Континентального (окраинно-континентального) рифта	Шельфа	Континентального склона	Островодужные	Активной окраины андийского типа	
Палеозойский (С ₃ -Р)		BD ₂ Трахириолитовая BO ₁₋₂ Базальтриолит-андезитовая (вулканомиктовая)	КРС ₃ -O ₁ КРС ₃ -O ₁ Песчаниково-галечная	ШS ₂ -D ₂ Известняково-доломитовая ШO ₁ -2 Алевритопесчаниковая		CS-D ₁ Известняково-глинисто-кремнистая (углерод-содержащая)		KO ₁₋₂ Ультрамафитовая
Рифейско-раннекембрийский (R ₃ -C ₁)					Известняково-песчаниково-глинистая (углерод-содержащая)		OAV-C Риолит-базальтовая OAV-C Алевритопесчаниковая OR ₃ Габбро-диорит-гранодиоритовая OR ₃ OR ₃ Базальт-андезит-дацитовая	

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

⑤ Главные структуры и их номера
Антиклинории

Малокарский

Блоки: Оченырдский — 4, Лекынтальбейский — 6

Паравтохтоны

Карско-Нярминский — 5

△ Палеовулканические структуры и их номера

- 1 — Хахаремская
- 2 — Малая Кальдера-Пэ
- 3 — Восточнокызыгейская
- 4 — Лядгейская
- 5 — Кызыгейская
- 6 — Мунтысяпейская
- 7 — Тизнезашорская

Разрывные нарушения

Главные

Прочие

(структурные швы) (а — достоверные, б — предполагаемые)

Надвиги

Надвиги

Неустановленной кинематики

Разломы — ограничения вулcano-тектонических структур

Геологические границы

Разрывные нарушения

Главные (структурные швы)

М — Малотальбейский, С — Саурейяхинский

□ Второстепенные

- 2 — Тизнезатинский
- 4 — Верхненярминский
- 5 — Нярминский
- 6 — Сангаряхинский
- 8 — Кызыгейский
- 10 — Озерный
- 11 — Бедашорский
- 12 — Малохуутинский

Интрузивные массивы и их номера

- 1 — Хахаремский, 2 — Кызыгейский,
- 3 — Бедашорский, 4 — Комсомольский

Рис. 1а. Условные обозначения к рис. 1.

типы метасоматитов (березиты, пропициты, вторичные кварциты, серицит-гидрослюдисто-кварцевые метасоматиты) установлены по данным космодешифрирования на площади Лядгейской и Мунтысяпейской палеовулканических структур. ореол березитов и серицит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов отмечен также на южной пе-

риферии Хахаремской палеовулканической структуры. Методические подходы для использования многозональной космической съемки ASTER с целью получения информации по различным типам метасоматических пород изложены в наших публикациях (Миловский и др., 2023). Использовались замеренные и библиотечные спектры эталон-

ных минералов из источников свободного доступа NASA и др. (JPL, USGS).

С помощью космической съемки высокого разрешения Ресурс-П проведено изучение геологических структур площади Хахаремпэ, в пределах которой ранее была установлена молибденит-настурановая

минерализация. Три проявления урана (Валерьевское III-1-3, Валентиновское III-2-1, Андриано-Павловское III-2-3) расположены в экзоконтакте Хахаремского массива трахириолитов и относятся к молибденит-настурановой рудной формации (рис. 4). Андриано-Павловское проявление урана (III-2-3) является наиболее изученным, залегает

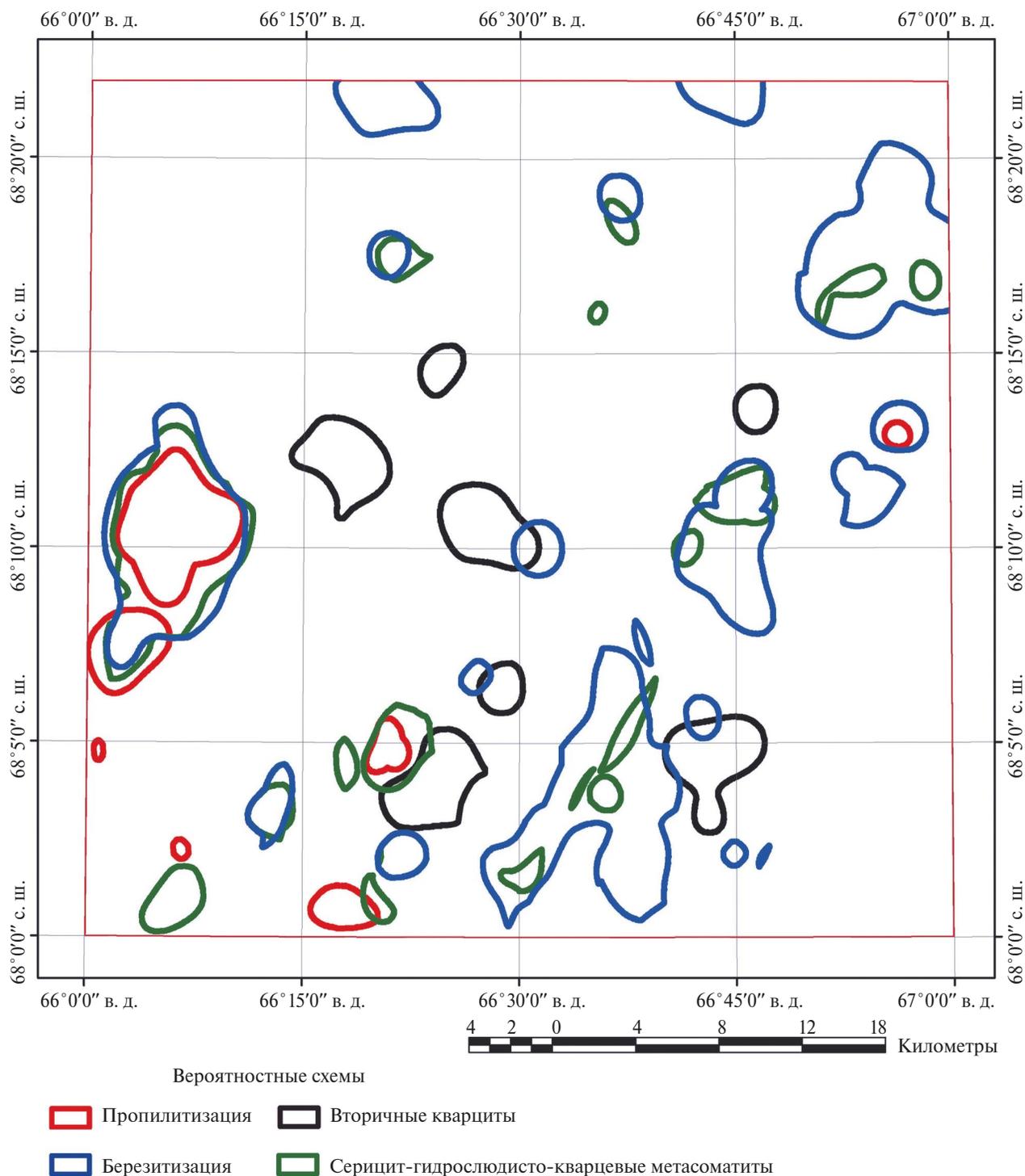


Рис. 3. Карта метасоматических пород по материалам космической съемки ASTER. R-42-XXXI.

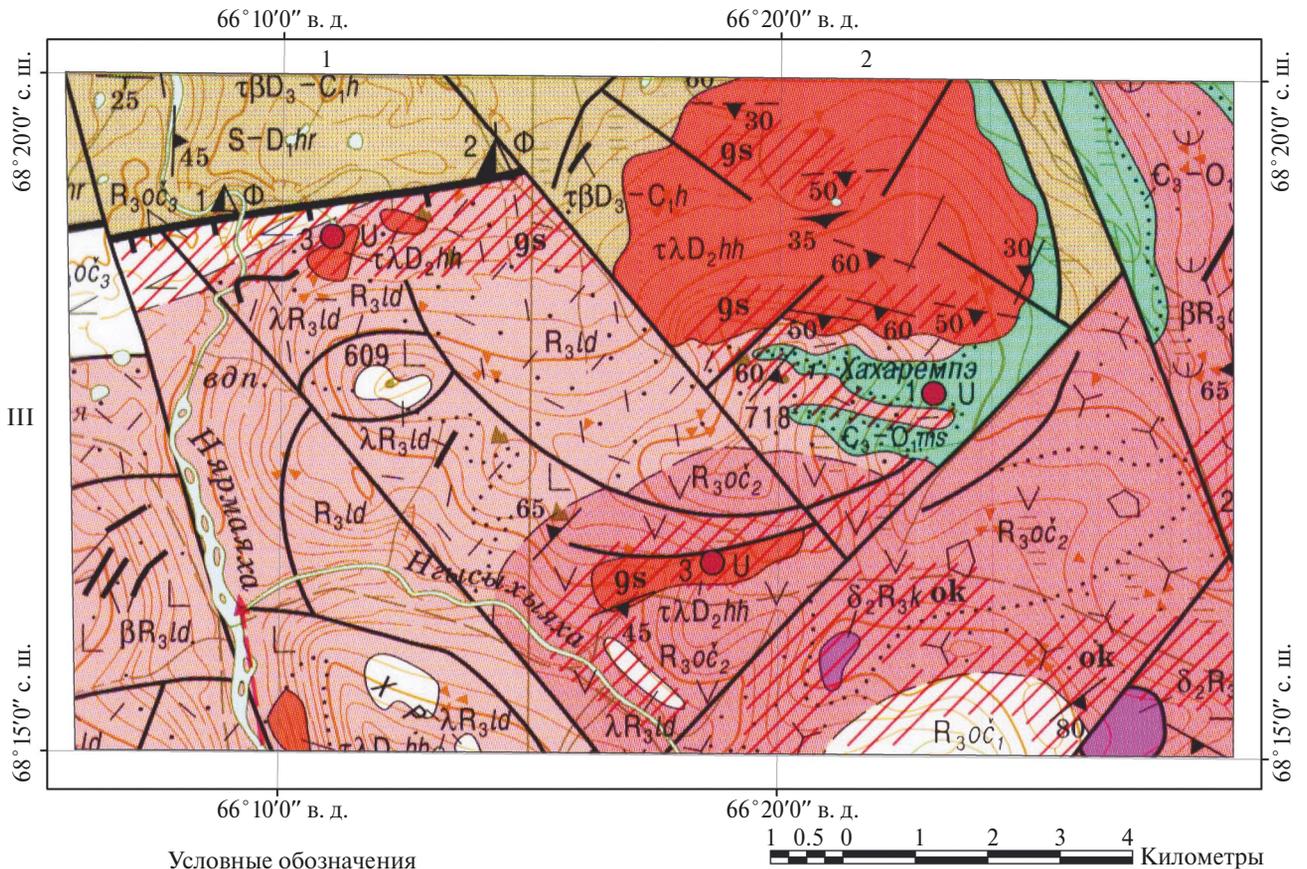


Рис. 4. Площадь детализации Хахаремпэ. Карта полезных ископаемых масштаба 1:200000. R-42-XXXI. Условные обозначения см. на рис. 4а.

в толще вулканогенно-осадочных пород среднего состава очетывисской свиты (R_3 о \check{c}). Приурочено к субширотному телу гидротермально-измененных трахириолитов хахаремского комплекса ($\tau\lambda D_2$ hh). В теле трахириолитов шесть рудоносных зон, контролируемых тектоническими нарушениями северо-западного простирания. В рудоносных зонах проявлена прожилково-вкрапленная рудная минерализация настурана, пирита, галенита, сфалерита, арсенопирита. Урановая минерализация наложена на полиметаллическую.

В результате обработки материалов космической съемки (рис. 5) площади Хахаремпэ выявлены линеаменты северо-западного, северо-восточного и субширотного направления; локальные кольце-

вые структуры; проведено оконтуривание границ лаво-пирокластических и субвулканических образований по фототону. Преобладающим развитием пользуются разрывные нарушения северо-западного простирания – Няرمинский, Кызыгейский и др. Эти разломы осложнены мелкими сдвиговыми деформациями преимущественно северо-восточного простирания. Малотальбейская шовная зона представлена несколькими субпараллельными дизъюнктивами, осложненными разломами северо-западного простирания. В строении Хахаремской кольцевой структуры выявлены дуговые и линейные разрывные нарушения, отражающие особенности строения как массива трахириолитов, так и вмещающих его пород. По юго-юго-восточному обрамлению Хахаремской кольцевой струк-

Хойтальбейский комплекс трахидолеритовый

$\tau\beta D_3-C_1h$ $\tau\beta D_3-C_1h$ Малые тела, силлы, дайки трахидолеритов

Хахаремский комплекс трахириолитовый

$\tau\lambda D_2/hh$ Трахириолиты

$S-D_1hr$ Харотская свита. Сланцы углеродисто-кремнистые, кремнисто-глинистые, углеродисто-глинистые, известняки глинистые, алевролиты, трахибазальты, трахиандезитбазальты (200–320 м)

БЕЛЬСКО-ЕЛЕЦКАЯ СТРУКТУРНО-ФОРМАЦИОННАЯ ЗОНА
ИРГИЗЛИНСКО-КАРСКАЯ ПОДЗОНА

C_3-O_1ms Минисейская свита. Конгломераты редкогалечниковые, песчаники красноцветные, гравелиты, алевролиты кварцевые, кварциты (200–1000 м)

ПОЛЯРНО-УРАЛЬСКАЯ СТРУКТУРНО-ФОРМАЦИОННАЯ ЗОНА
ОЧЕНЫРДСКАЯ ПОДЗОНА

Лядгейский комплекс базальт-риолитовый вулканический

R_3ld Лядгейская свита. Риолиты (лавобрекнии), дациты, андезитбазальты, базальты афировые и их туфы, туфопесчаники (до 2000 м) λR_3ld βR_3ld λR_3ld Лядгейские субвулканические образования. Малые тела базальтов, риолитов порфировых. Дайки базальтов, риолитов порфировых

Кызыгейский комплекс габбро-диорит-гранодиоритовый $\delta_2 R_3k$ Вторая фаза. Диориты

Очетывисский комплекс базальт-андезит-дацитовый вулканический

R_3OC_3 Верхняя подсвита. Базальты, андезитбазальты афировые и их туфы, игнимбриты (более 1000 м) αR_3OC βR_3OC λR_3OC Очетывисские субвулканические образования. Малые тела базальтов, андезитов. Дайки базальтов, риодацитов, аднезитов (α)

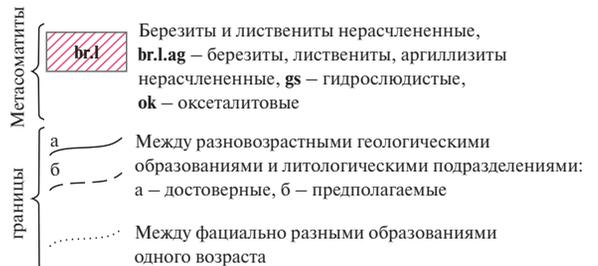
R_3OC_2 Средняя подсвита. Андезитбазальты, андезиты, андезидациты, дациты порфировые и их туфы, туфолавы, лавобрекнии, прослои кварцитов, известняков мраморизованных, сланцев углеродисто-кремнистых (более 1000 м)

R_3OC_1 Нижняя подсвита. Песчаники, алевропесчаники, сланцы алевроитовые, кремнисто-глинистые, углеродисто-кремнистые, базальты, андезитбазальты и их туфы, туфопесчаники (более 1000 м)

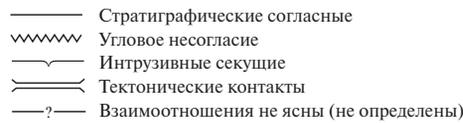
Вулканогенные и субвулканические породы состава



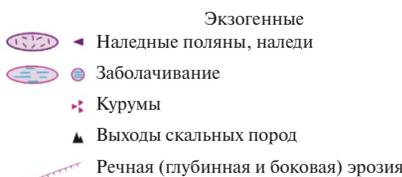
Геологические границы



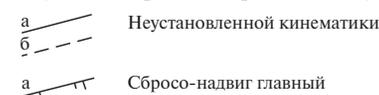
Обозначения взаимоотношений геологических подразделений в условных обозначениях на стратиграфической колонке



ПРИРОДНЫЕ НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБЪЕКТЫ (а – ареалы и зоны развития, б – локальные участки и внемасштабные объекты)



Разрывные нарушения (а – достоверные, б – предполагаемые)



Элементы залегания

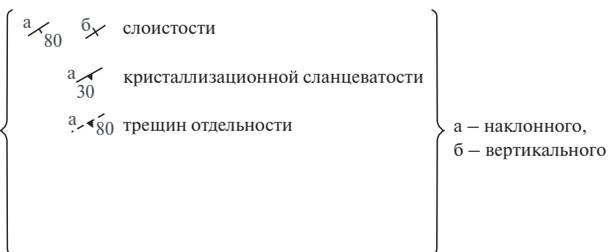


Рис. 4а. Условные обозначения к рис. 4.

туры отдешифрирована (по фототону) граница риолитовых туфов лядгейской свиты (R_3ld) и алевропесчаников минисейской свиты (E_3-O_1ms). В южной части площади детализации по фототону отдешифрированы контуры интрузивного тела диоритов кзыгейского комплекса (δ_2R_3k), локализованного в поле развития эффузивных образований (андезитов) отчетывисской свиты ($R_3o\check{c}_2$).

При более детальном рассмотрении площади Хахаремпэ в масштабе 1:20000 на КС выявлены дополнительные структурные элементы, представленные линеаментами субширотного и северо-западного простирания, дуговыми структурами. Локальные кольцевые структуры на площади Хахаремпэ установлены в поле вулканитов отчетывисской и лядгейской свит. Они осложнены разрывными нарушениями и тяготеют к крупным линейным дизъюнктивам северо-восточного и северо-западного простирания.

Рудопоявление Валерьевское (III-1-3) приурочено к штоку трахириолитов хахаремского комплекса в дуге пересечения разломов северо-восточного и северо-западного простирания. Рудопоявление Валентиновское (III-2-1) тяготеет к разлому северо-западного простирания в области контакта лядгейской и минисейской свит. В этой области по результатам обработки многозональной космической съемки ASTER можно прогнозировать наличие березитов и серицит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов. Рудопоявление Андриано-Павловское (III-2-3), как отмечалось выше, приурочено к субширотному телу трахириолитов хахаремского комплекса. Контуры этого тела были отдешифрированы по фототону. В центральной части тела отмечено смещение по разлому северо-западного простирания.

Таким образом, комплексный анализ многозональной космической съемки, включая съемку



Рис. 5. Площадь детализации Хахаремпэ. Космическая съемка Ресурс-П маршрут № 9861_1. Канал 10. R-42-XXXI.

высокого разрешения Ресурс-П, показал, что для прогнозирования оруденения в масштабе как рудных полей, так и отдельных перспективных участков (месторождений) может быть использован широкий спектр поисковых признаков, включающий структурный фактор (линейные, дуговые, кольцевые структуры различного ранга), литологический фактор (оценка литологического состава рудовмещающих пород по фототону) и фактор гидротермальных изменений (выявление метасоматитов различного состава, предшествующих и сопутствующих процессу рудоотложения).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМОДЕШИФРИРОВАНИЯ ПЛОЩАДИ ХАДАТИНСКАЯ (ХРОМИТО-ПЛАТИНОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ)

Детальное изучение обнаруженных в конце XX века месторождений коренной платины нижнетагильского типа показало, что содержания суммы металлов платиновой группы (МПП) связаны с железистостью дунита (Додин и др., 2010). Количество МПП в рудных зонах составляет 2–10 г/т (иногда содержание Pt достигает 20–50 г/т). Металлогенический потенциал коренной платины нижнетагильского типа составляет 19000 т. По целому ряду параметров нижнетагильский тип аналогичен знаменитому Бушвельду. Ряд проявлений этого типа установлен на Полярном и Приполярном Урале, достигая массивов Рай-Из и Сьум-Кеу. Изучение платиноносности ультраосновного массива Сьум-Кеу выявило два типа платинометальной минерализации, связанной с хромитовыми рудами и проявлениями сульфидов (Гурская и др., 2003). Хромитовые руды отличаются развитием трех минеральных ассоциаций: эрлихманит-лауритовой в высокомагнезиальных хромитовых рудах, сперрилит-ирарсит-лауритовой в глиноземистых хромитовых рудах, обогащенных сульфидами и ферро-платиновой в крупнозернистых перекристаллизованных дунитах с убоговкрапленными хромитами высокожелезистого состава.

Хадатинская площадь расположена в южной части гипербазитового массива Сьум-Кеу (рис. 6). Раннесилурийская интрузия Сьум-Кеу представлена гипербазитами дунит-гарцбургитовой формации (Геологическая..., 1984; Государственная..., 2014). Гипербазитовый массив Сьум-Кеу приурочен к дугообразному сопряжению в зоне Главного глубинного разлома, отделяющего восточное крыло Центрально-Уральского антиклинория от западного крыла Щучинского синклинория. В строении массива Сьум-Кеу принимают участие серпентиниты, пироксениты, перидотиты и дуниты. Серпентиниты развиты в небольших масштабах. Они

слагают западную приконтактовую часть массива Сьум-Кеу. Пироксениты фиксируются в основном в восточной периферической части массива Сьум-Кеу, где слагают сравнительно небольшие тела (до 1.5×7 км). Жильные пироксениты встречаются довольно часто среди перидотитов и дунитов массива Сьум-Кеу в виде даек мощностью до 8–10 м. Перидотиты являются самыми распространенными породами массива Сьум-Кеу. Полосчатость в перидотитах обусловлена чередованием участков разного состава. Участки в виде полос и вытянутых шлиров, состоящие преимущественно из пироксена, чередуются с такими же участками, состоящими из одного оливина или почти одного оливина. Мощность полос и шлиров измеряется десятками сантиметров, или метрами. Перидотиты представлены почти исключительно гарцбургитами и очень редко верлитами. Гарцбургиты состоят из оливина (70–80%), ромбического пироксена (15–30%). Верлиты встречаются иногда в восточной приконтактовой части массива Сьум-Кеу. Основными породообразующими минералами являются оливин и моноклинный пироксен. Дуниты обособляются среди гарцбургитов как в виде крупных вытянутых тел, так и маломощных полос и шлиров в полосчатых гарцбургитах. В серпентинизированных разностях наблюдается петельчатая или сетчатая структура. Габбро-нориты встречаются в виде небольших тел, прорывающих гипербазиты Сьум-Кеу и вмещающие их габбро-амфиболиты.

В пределах Хадатинской площади для исследований возможностей многозональной космической съемки и космической съемки (КС) высокого разрешения выбраны два участка – Хадатинский и Южно-Хадатинский, представляющие собой хромитоносные зоны, локализованные в структурах различной пространственной ориентации. Хадатинский участок включает прерывистую линейную хромитоносную зону со струйчато-полосчатым оруденением. В результате дешифрирования КС Канопус подтвержден прерывистый характер рудоносной зоны, который может быть обусловлен смещениями по разломам северо-восточного простирания (рис. 7). Проявления хромитов приурочены к дунитам, в связи с этим представляет интерес определение границ дунитовых тел в пределах поля гипербазитов по материалам КС высокого разрешения. На рисунке 8 представлены результаты определения границ дунитов Хадатинского участка по фототону КС Ресурс. Другая процедура обработки КС Ресурс была направлена на уточнение границ струйчато-полосчатого строения оруденения в пределах дунитовых тел. Возможности многозональной КС высокого разрешения для прогнозирования хромитового оруденения представлены на рисунке 9. На Южно-Хадатинском участке по геологическим данным выделены две хромитоносные зоны.

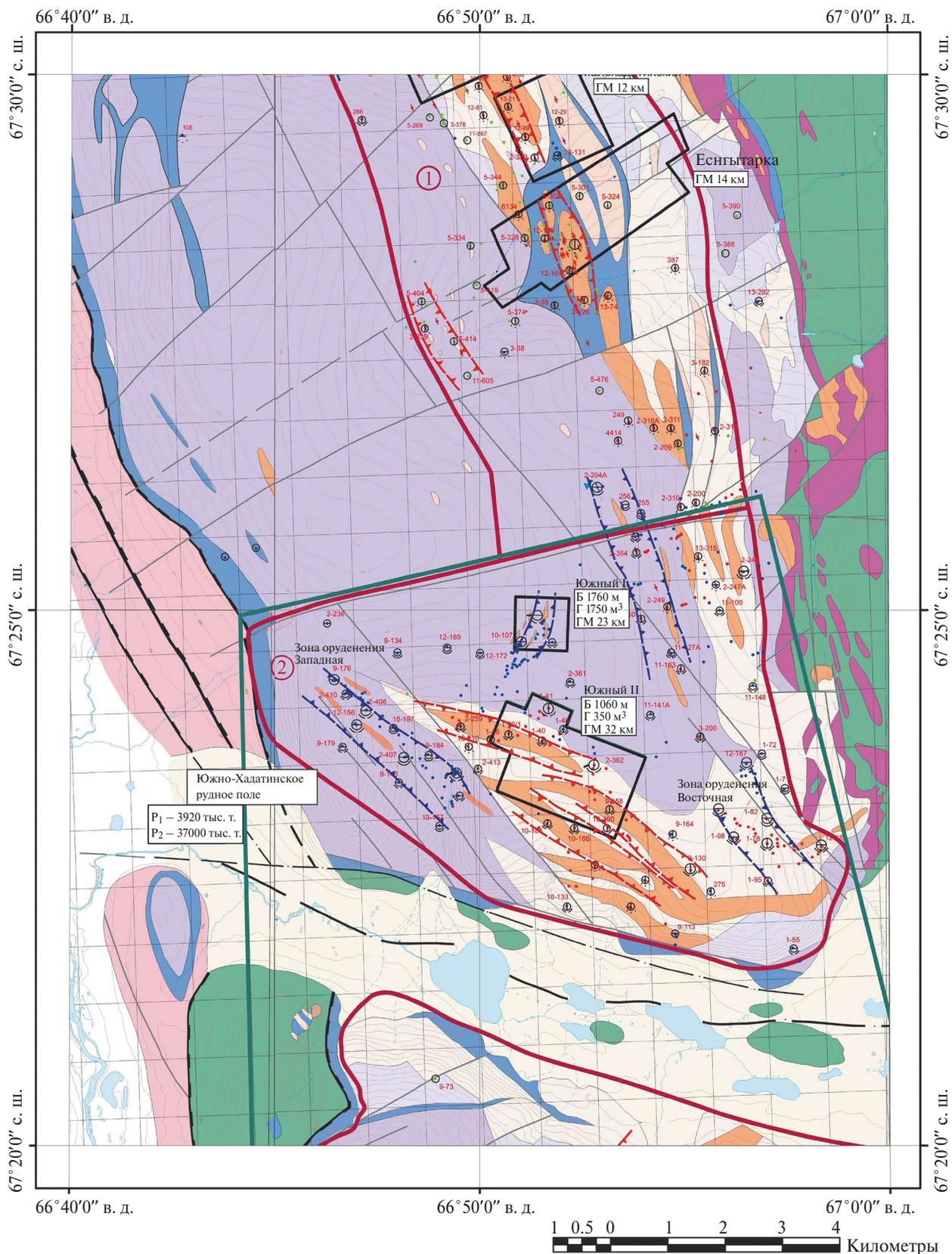


Рис. 6. Геологическая схема южной части гипербазитового массива Сьум-Кеу с выделением рудных полей. Q-42-I. Условные обозначения на рис. 6а.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

-  Четвертичные отложения, нерасчлененные (Q)
-  Няровейский комплекс метаморфитов (PR₃пг)
-  Харампэйско-масловский комплекс габброидов нерасчлененных (O₃-S₁hm)

КОМПЛЕКСЫ МАНТИЙНЫХ ГИПЕРБАЗИТОВ (O₃-S₁):
Дунит-верлит клинопироксенитовый комплекс

-  Дуниты, верлиты и клинопироксениты нерасчлененные
 -  Дуниты с клинопироксеном
 -  Клинопироксениты и вебстериты
- Дунит – гарцбургитовый комплекс
-  Гарцбургиты с линейными и шпировыми выделениями дунитов до 10%
 -  Гарцбургиты с шпирово-полосчатыми выделениями дунитов 10–30%
 -  Гарцбургиты с шпирово-полосчатыми выделениями дунитов свыше 30%
 -  Дуниты
 -  Серпентиниты брусит-антигоритовые

Градация хромоворудных объектов:

-  1-107 Проявления (1–107)
-  1-95 Пункты минерализации (1–95)

-  Морфология рудных тел уплощенно-линзовидная

Характеристика хромовых руд по густоте вкрапленности:

-  Густовкрапленные и сплошные
-  Редко-средневкрапленные
-  Убоговкрапленные

Минеральные типы хромовых руд:

-  Высокохромистые (Cr₂O₃ в хромшпинелиде > 46%)
-  Глиноземистые (Cr₂O₃ в хромшпинелиде < 46%, Al₂O₃ > 17%)

А. высокохромистый тип (красное); Б. глиноземистый тип (синее)

-  А 2-109
-  Б 5-97
- Отдельные рудные точки (единичные обломки хромовых руд)
- Внемасштабные изображения струйчато-полосчатого оруденения
- Хромитоносные зоны
- Контуры рудных полей, их номера и названия:
 1. Хадатинское рудное поле
 2. Южно-Хадатинское рудное поле
- Южный I
- Контуры детализационных участков и их названия.
- Виды геологоразведочных работ:
 - Б. бурение поисковых скважин глубиной до 50–150 м;
 - Г. горные работы (проходка канав);
 - ГМ. гравимагниторазведочные работы (шаг наблюдений 20 (10) м) в профильном варианте

Рис. 6а. Условные обозначения к рис. 6, 7, 8, 10.

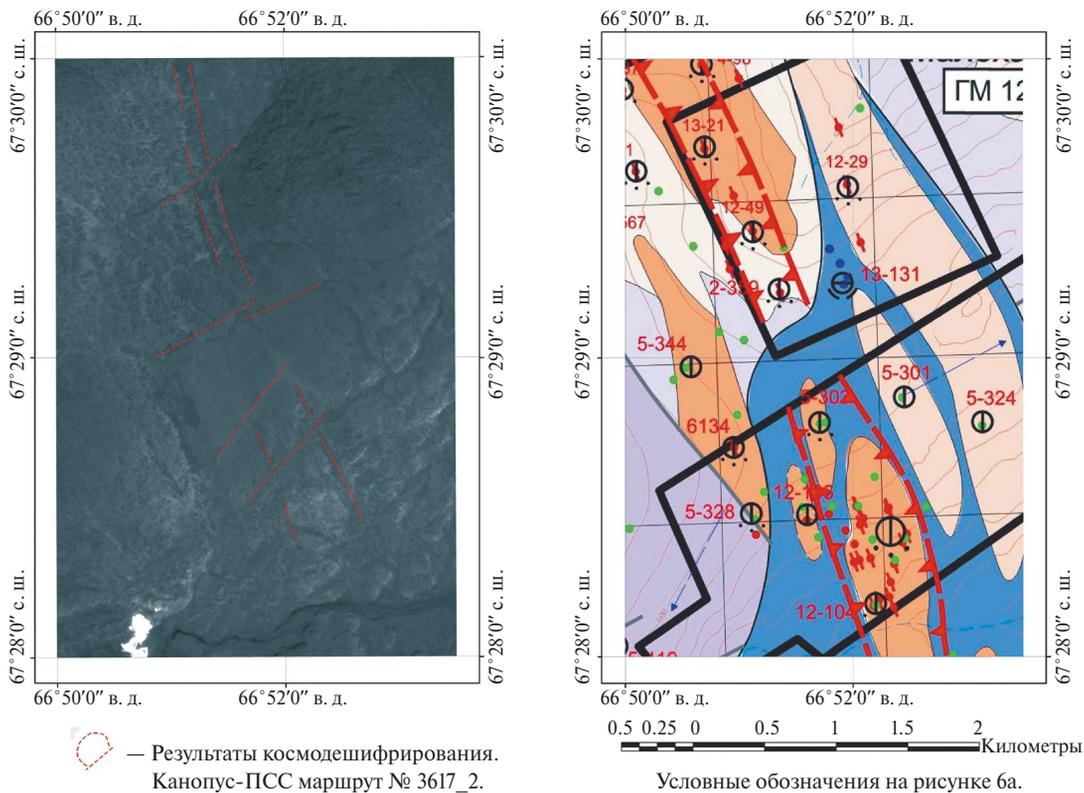


Рис. 7. Участок детализации Хадатинский.

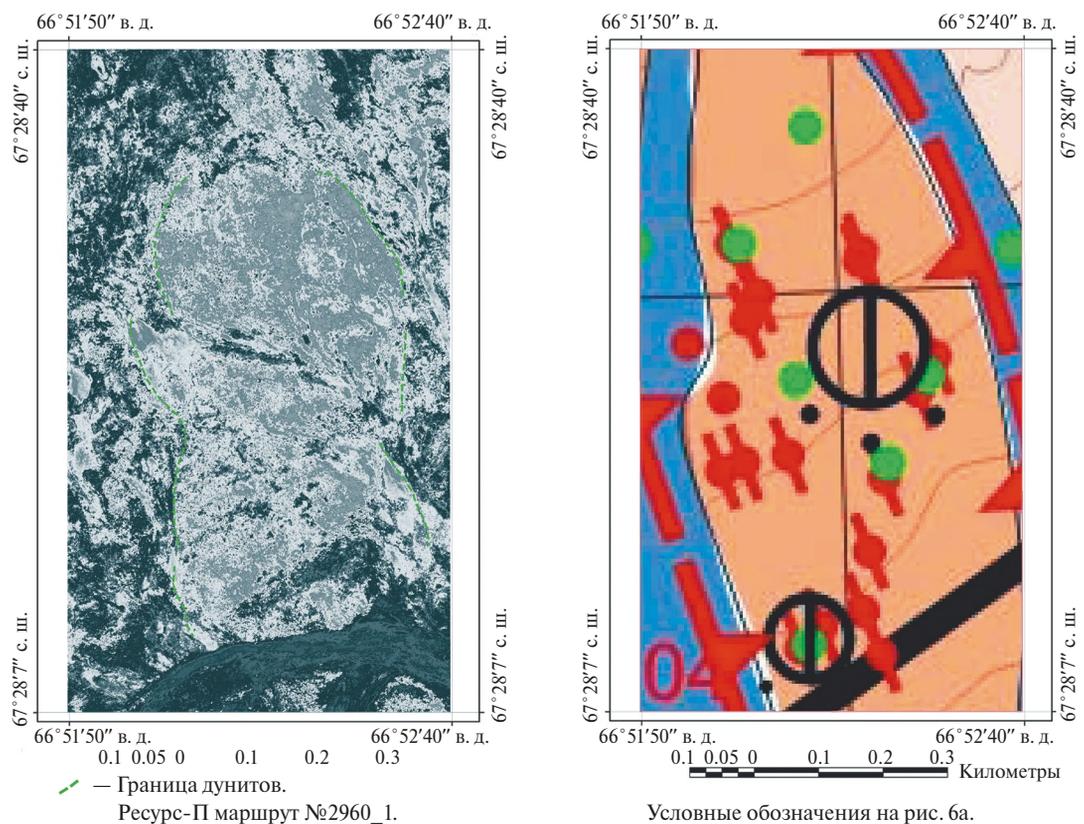


Рис. 8. Участок детализации Хадатинский. Особенности строения дунитовых тел.

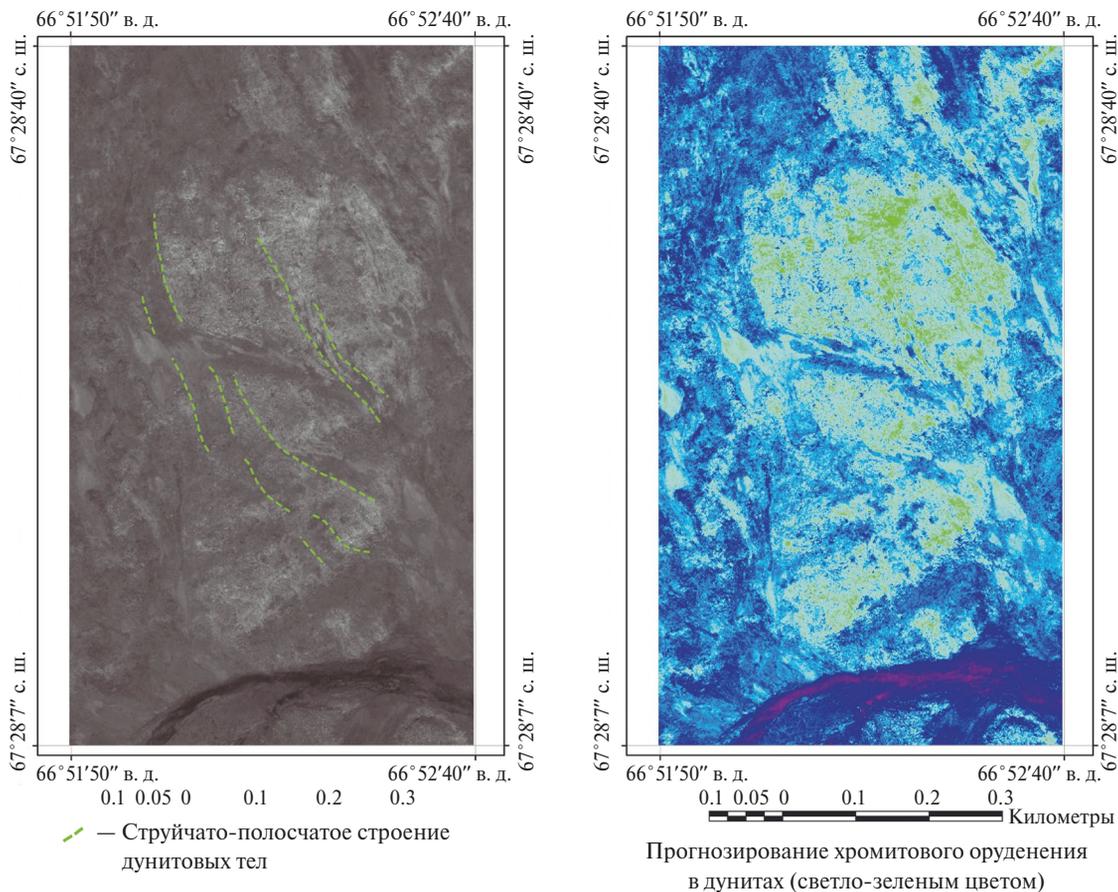


Рис. 9. Участок детализации Хадатинский. Ресурс-П маршрут № 2960_1.

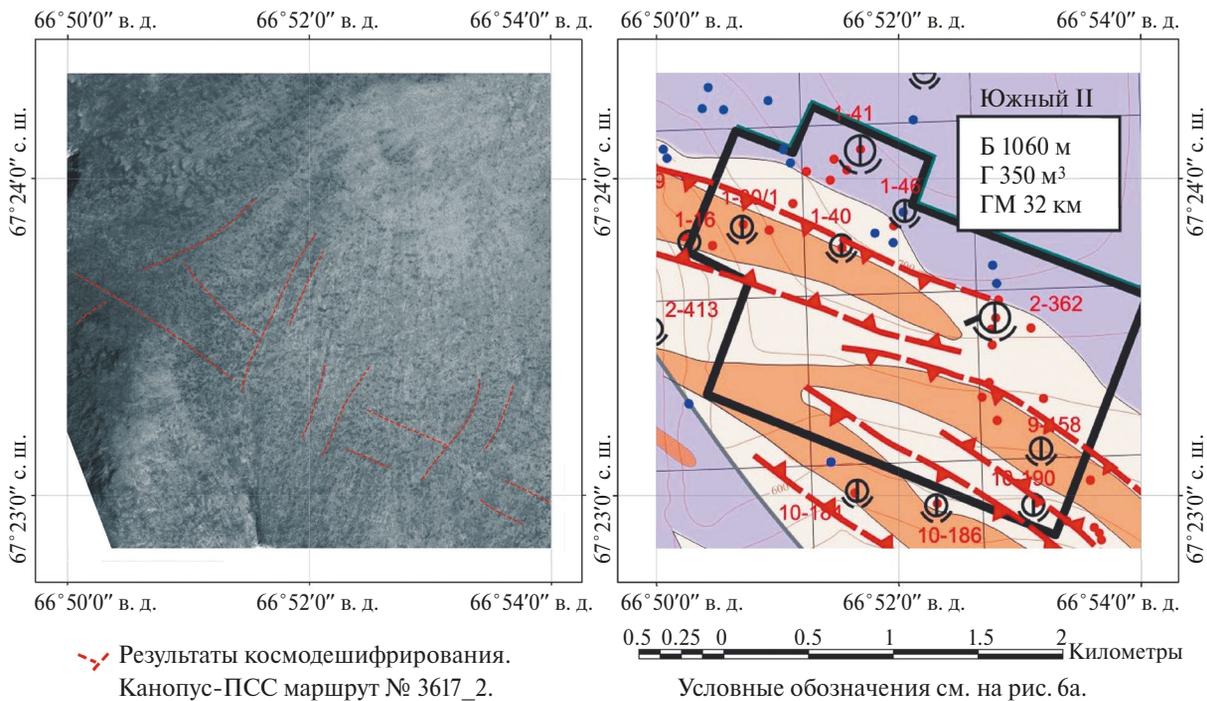


Рис. 10. Участок детализации Южно-Хадатинский.

Анализ КС Ресурс позволяет на данной площади выделить только одну зону северо-западного простирания, разделенную на три фрагмента дизъюнктивными северо-восточной ориентации (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе компьютерной обработки ИК-космической съемки площади Хахаремпэ выявлены дизъюнктивы, контролирующие размещение молибденит-настурановой минерализации, и площади развития гидротермально-изменённых пород (безрезитов, серицит-гидрослюдисто-кварцевых метасоматитов). Преобладающим развитием используются разрывные нарушения северо-западного простирания, которые осложнены мелкими сдвиговыми деформациями преимущественно северо-восточного простирания. Анализ многозональной космической съемки, включая съемку высокого разрешения Ресурс-П, показал, что для прогнозирования молибденит-настуранового оруденения в масштабе как рудных полей, так и отдельных перспективных участков (месторождений) может быть использован широкий спектр поисковых признаков, включающий структурный фактор (линейные, дуговые, кольцевые структуры различного ранга), литологический фактор (оконтуривание границ лаво-пирокластических и субвулканических образований по фототону) и фактор гидротермальных изменений (выявление метасоматитов различного состава, предшествующих и сопутствующих процессу рудоотложения).

Применение космической съемки высокого разрешения в пределах Хадатинской площади массива Сыум-Кеу позволило определить структурную позицию хромитоносных зон и уточнить границы рудовмещающих дунитов по фототону. В результате дешифрирования космической съемки Канопус-ПСС и Ресурс-П установлен прерывистый характер рудоносной зоны, который обусловлен смещениями по разломам северо-восточного простирания, определены контуры дунитовых тел

в пределах поля гипербазитов. Обработка космической съемки Ресурс-П позволила уточнить границы струйчато-полосчатого строения оруденения в пределах дунитовых тел.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме Госзадания № 122040300015-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бойцов В.Е., Верчеба А.А.* Геолого-промышленные типы месторождений урана: М.: КДУ, 2008. 310 с
- Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-42-1. Объяснительная записка. М.: ВСЕГЕИ, 1984. (Министерство геологии СССР, Главное Тюменское ПГО).
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Второе издание. Серия Полярно-Уральская. Лист R-42-XXXI, XXXII. Объяснительная записка. – СПб., ВСЕГЕИ., 2003. (МПР России по Ямало-Ненецкому АО).
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Гурская Л.И., Смелова Л.В.* Платинометальное минералообразование и строение массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Геология рудных месторождений, 2003, 45, 4, 353-371.
- Додин Д.А., Додина Т.С., Золоев К.К., Коротеев В.А., Чернышов Н.М.* Платина России: состояние и перспективы // Литосфера. 2010. № 1. С. 3–36.
- Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мичута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н.* Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
- Миловский Г.А., Кирсанов А.А., Липияйнен К.Л., Апарин А.Д.* Прогнозирование золото-серебряного оруденения в пределах Пепенвеемской рудной зоны Чукотского полуострова на основе космической съемки Ресурс, Канопус и ASTER // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 4. С. 26–41.
- JPL (<https://speclib.jpl.nasa.gov/library>).
- USGS (<https://crustal.usgs.gov/speclab/QueryAll07a.php>).

The Use of Space Survey Materials Resurs-P, Canopus-PSS, ASTER and Landsat for Forecasting Uranium-Molybdenum and Chromite-Platinum Mineralization in the Polar Urals

G. A. Milovsky¹, A. D. Aparin¹, A. R. Ibragimov¹, A. A. Kirsanov², K. L. Lipiyainen²

¹Scientific Geoinformation Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²All-Russian Scientific Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky, St. Petersburg, Russia

Methods of complex analysis of the results of space, gravimetric and magnetometric surveys for localization of ore-promising sites in the Polar Urals within the nomenclature sheets R-42, Q-42 have been developed. When decoding the materials of multi-zone satellite imagery of medium (ASTER, Landsat) and high (Canopus-

PSS, Resurs-P) resolution, linear, arc and ring structural elements controlling the localization of uranium-molybdenum and chromite-platinum mineralization of the Polar Urals were revealed. The decoding of zones of metasomatically altered rocks in various spectral IR channels made it possible to localize areas for detailed work. Based on high-resolution satellite imagery, large-scale structural and tectonic schemes have been prepared and areas of detail for ground-based verification work have been outlined.

Keywords: multi-zone satellite imagery, search signs, deposits, chromium, platinum, uranium, molybdenum, Polar Urals

REFERENCES

- Boytsov V.E., Vercheba A.A.* Geologo-promyshlennye tipy mestorozhdenij urana: M.: KDU, 2008. 310 p.
- Geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1:200000. Seriya Severo-Ural'skaya. List Q-42-I. Ob'yasnitel'naya zapiska. M.: VSEGEI, 1984. (Ministerstvo geologii SSSR, Glavnoe Tyumenskoe PGO).
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1:200000. Vtoroe izdanie. Seriya Polyarno-Ural'skaya. List R-42-XXXI, XXXII. Ob'yasnitel'naya zapiska. SPb., VSEGEI, 2003. (MPR Rossii po Yamalo-Nenec'komu AO).
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List Q-42 Salekhard: Ob'yasnitel'naya zapiska. SPb.: VSEGEI, 2014. 396 p.
- Gurskaya L.I., Smelova L.V.* Platinometal'noe mineralo-obrazovanie i stroenie massiva Syum-Keu (Polyarnyj Ural) // Geologiya rudnyh mestorozhdenij, 2003, 45, 4, 353-371.
- Dodin D.A., Dodina T.S., Zoloev K.K., Koroteev V.A., Chernyshov N.M.* Platina Rossii: sostoyanie i perspektivy // Litosfera. 2010. № 1. P. 3–36.
- Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Michuta A.K., Shumilin M.V., Shchetochkin V.N.* Uran rossijskih neдр. M.: VIMS, 2010, 850 p.
- Milovsky G.A., Kirsanov A.A., Lipiyainen K.L., Aparin A.D.* Prognozirovanie zoloto-serebryanogo orudneniya v predelah Pepenveemskoj rudnoj zony CHukotskogo poluostrova na osnove kosmicheskoi s'emki Resurs, Kanopus i ASTER // Issled. Zemli iz kosmosa. 2023. № 4. P. 26–41.
- JPL* (<https://speclib.jpl.nasa.gov/library>).
- USGS* (<https://crustal.usgs.gov/speclab/QueryAll07a.php>).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТРУКТУРА ВОД В ПЕРИОД НАГУЛЬНЫХ МИГРАЦИЙ ТИХООКЕАНСКОГО КАЛЬМАРА В ЯПОНСКОМ МОРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2025 г. А. А. Никитин¹, *, И. Л. Цыпышева¹, Н. М. Мокрин¹

¹Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО), Владивосток, Россия

*E-mail: aleksandr.nikitin@tinro.vniro.ru

Поступила в редакцию 01.08.2024 г.

По данным архива температуры поверхности моря за 2018–2023 гг., восстановленной по данным спутников AQUA, TERRA (спектрорадиометр MODIS), с пространственным разрешением 1 км, полученной и обработанной в Центре коллективного пользования Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН, были проанализированы термические и динамические условия вод северо-западной части Японского моря и рассмотрены районы ярусного (джиггерного) промысла тихоокеанского кальмара в Японском море. Анализ спутниковых материалов позволил выявить в поле пространственного распределения температуры поверхности моря элементы термической структуры, в которых успешно велся лов тихоокеанского кальмара. В первую очередь формирование районов промысла кальмара зависело от развития или ослабления ветвей Цусимского и Приморского течений, наличия мезомасштабных вихревых структур в их водах. Скопления кальмара в большинстве случаев были приурочены к районам вихревого апвеллинга. Максимальные уловы сосредоточены на периферии субтропических антициклонических вихрей, граничащих с субарктическими водами. Если вихрь имел спиралевидную структуру, то скопления в основном были сосредоточены в центре вихря. Если заток субтропических вод принимал форму грибовидного течения, то крупные уловы в основном отмечались в струе течения и в зонах антициклонического и циклонического завихрения диполя. Во фронтальной зоне субтропических и субарктических вод районы промысла кальмара находились с теплой стороны Субарктического (Полярного) фронта.

Ключевые слова: Японское море, тихоокеанский кальмар (*Todarodes pacificus*), спутниковая информация, температура, вихри, адвекция, струйные течения, грибовидные течения

DOI: 10.31857/S0205961425010063, EDN: DHZZWE

ВВЕДЕНИЕ

Тихоокеанский кальмар (*Todarodes pacificus*) – один из массовых видов эпипелагиали северо-западной части Тихого океана, имеющий важное промысловое значение в странах АТР. В годы высокой численности биомасса вида в исключительно экономической зоне (ИЭЗ) России Японского моря составляла до 79–97% от общего учтенного запаса nektona (Шунтов, 2016). Этот вид характеризуется коротким жизненным циклом (около 1 года), наличием протяженных миграций (рис. 1), охватывающих Восточно-Китайское, Японское, Охотское моря и тихоокеанские воды Японии и Курильских о-вов, а также значительными колебаниями численности (Мокрин, Хен, 2004; Gong at al., 2007; Kidokoro at al., 2010; Sakurai at al., 2013). С уменьшением численности кальмара менялась и география районов промысла.

Ранее основные характеристики среды для формирования скоплений кальмаров изучались

только с помощью контактных океанологических измерений (Мокрин, Слободской, 1998; Дьяков, 2003; Савиных и др., 2003; Mokrin at al., 2002; Новиков и др., 2007). С появлением новых алгоритмов обработки спутниковых сигналов возникла возможность давать не только качественную, но и количественную оценку температуры воды в морях на основе спутниковых измерений (Алексанин, Алексанина, 2006). Спутниковые изображения морской поверхности и результаты их обработки используются в качестве информационных источников, характеризующих гидрологические особенности среды обитания гидробионтов, прежде всего температуры воды. Важное экологическое значение температуры воды объясняется ее существенным влиянием на все без исключения биологические процессы в море, начиная с продуцирования первичного органического вещества и кончая поведением промысловых скоплений гидробионтов. Карты температуры поверхности Японского моря (ТПМ), построенные на основе

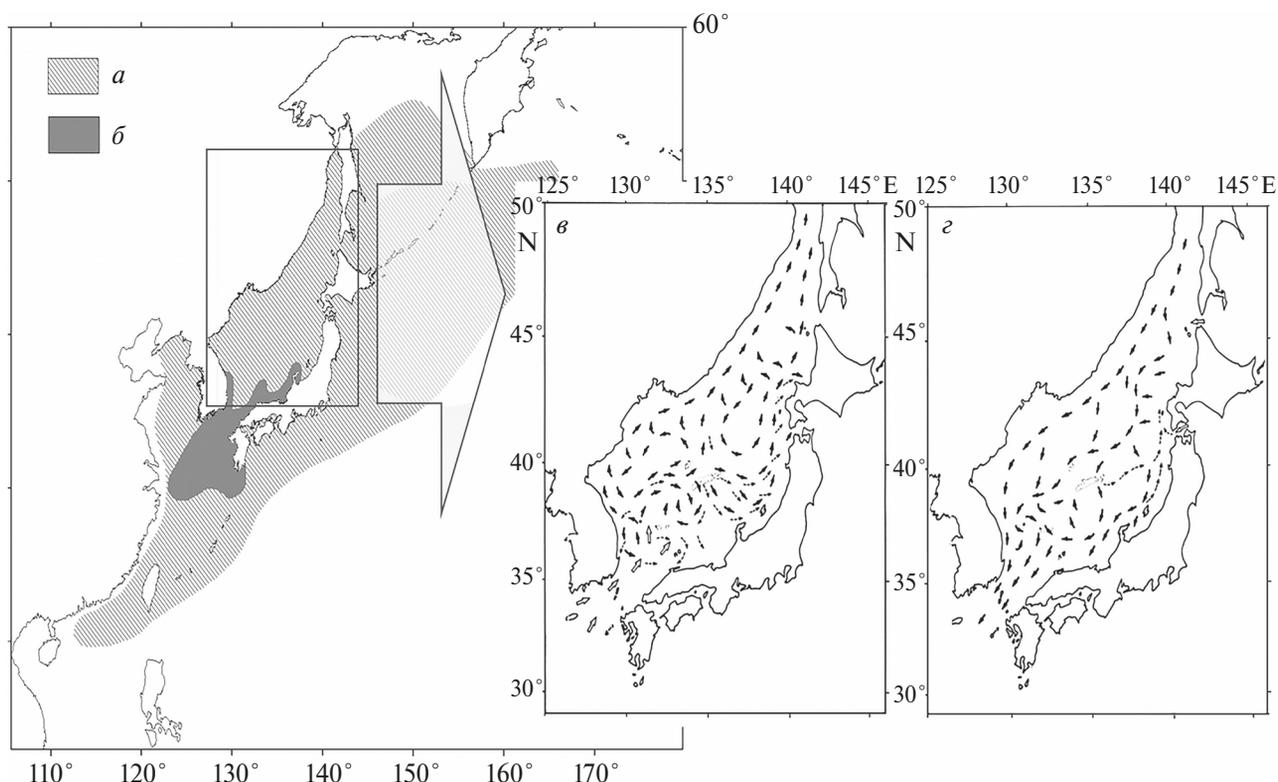


Рис. 1. Распространение тихоокеанского кальмара в северо-западной части Тихого океана: *a* – основа ареала, *б* – область размножения, пути миграций тихоокеанского кальмара в Японском море в весенне-летний (*в*) и осенний (*з*) периоды (по Kasahara, 1978).

данных спутникового мониторинга, позволяют, прежде всего, оценить состояние и динамику температурных условий промыслового района, оценить пространственно-временную изменчивость проявлений океанической циркуляции: течений, фронтальных зон, меандров и вихрей различных масштабов (Гинзбург и др., 1998; Никитин, 2006; Никитин, Юрасов, 2008). Вихревой апвеллинг, который возникает на границе вихрей, рассмотрен как механизм для создания благоприятных условий для образования промысловых скоплений сайры (Белоненко, Козуб, 2018), но этот механизм также можно рассматривать и для промысловых скоплений тихоокеанского кальмара.

Положение теплых вихрей обуславливают пути миграции не только пелагических видов рыб, но и влияют на распределение кальмара. Вихреобразование может указывать на начало миграции и определять сроки ее окончания (Никитин и др., 2004; Булатов и др., 2008; Самко, Булатов, 2014). Целью данной работы являлось выделить по спутниковой информации элементы структуры вод, в которых наблюдались наибольшие уловы ТК, для улучшения краткосрочного прогнозирования районов промысловых скоплений в период путины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели проводилось сопоставление районов ярусного (джиггерного) промысла ТК в подзоне Приморье Японского моря (по судовым суточным данным системы ЦСМС Росрыболовства, судосуточные уловы даны в тоннах) и элементов гидрологической обстановки в Японском море, полученных в результате дешифрирования инфракрасных спутниковых изображений в период путины 2018–2023 гг. Использовался архив температуры поверхности моря (ТПМ), восстановленной по данным спектрорадиометра MODIS (спутники AQUA, TERRA) в инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 1 км. Данные получены и обработаны в Центре коллективного пользования Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН (ЦКП). Дополнительно велся мониторинг и исследования в Японском море, проводились путем анализа суточной спутниковой информации ТПМ и ее аномалий. Данные получены на Copernicus Marine Service (URL: <http://marine.copernicus.eu>). Аномалии рассчитывались исходя из нормы за 1981–2010 гг.

Для анализа температурного режима вод северо-западной части Японского моря были вы-

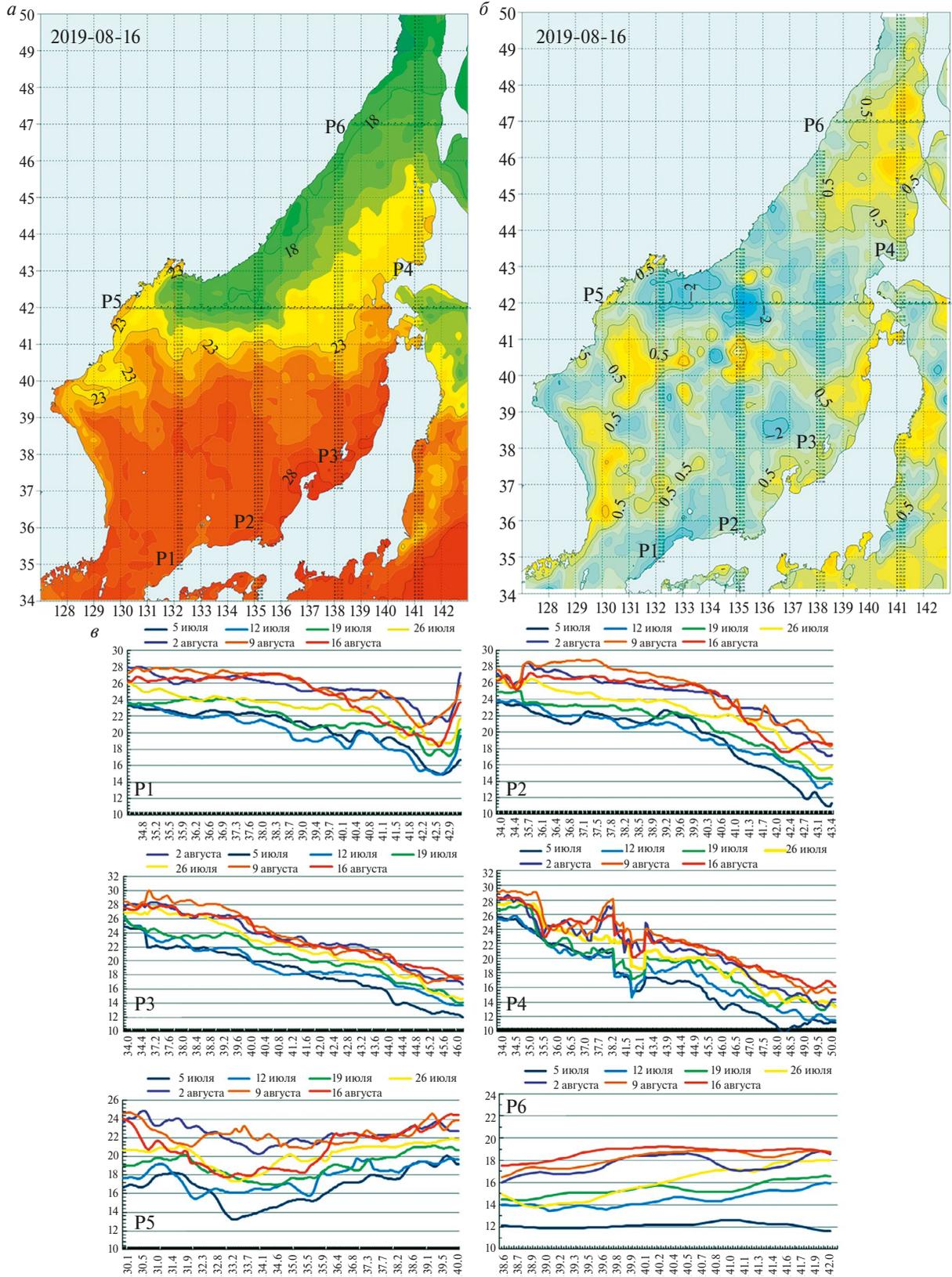


Рис. 2. Пространственное распределение температуры поверхности воды (а) и ее аномалии (б) 16.08.2019 г. (URL: <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>) и распределение температуры воды в июле-августе (в) на меридиональных разрезах по 132° в.д. (P.1), 135° в.д. (P.2), 138° в.д. (P.3), 141° в.д. (P.4) и на зональных разрезах по 42° с.ш. (P.5) и 47° с.ш. (P.6).

браны меридиональные разрезы по 132° в.д. (P.1), 135° в.д. (P.2), 138° в.д. (P.3), 141° в.д. (P.4) и зональные разрезы по 42° с.ш. (P.5) и 47° с.ш. (P.6) (рис. 2а, б). Принцип выбора разрезов был связан с положением интенсивных теплых потоков, которые совпадают с прохождением нагульных миграционных потоков пелагических видов рыб и кальмаров, а также связанных с районами промысла. Характеристика температурного режима районов промысла в северо-западной части Японского моря анализировалась по графикам изменения температуры воды на указанных разрезах в каждой декаде (рис. 2в).

Выделив положение интенсивных теплых потоков (рис. 3а), которые могут совпадать с прохождением миграционных потоков пелагических видов рыб и кальмаров, мы выделяли далее гидрологические элементы структуры вод в поле температуры, на участках которых велся промысловый лов ТК (рис. 3б). Для визуализации про-

странственного распределения ТПО по спутниковой информации использовалась программа Glance 1.95. При визуально-ручном дешифрировании, проводя коррекцию яркостных порогов снимков по гистограмме, добивались проявления водных масс по цвету. При этом наблюдались аномалии состояния морской поверхности, такие как мезомасштабные вихри и струйные грибовидные течения с вихревым диполем на конце, термические неоднородности апвеллинговых явлений. Например, на рисунке 4а показана более четкая структура спиралевидного антициклонического вихря (вихря закручивания) на спутниковом изображении при установлении нижнего барьера по температуре 16° С. По этому снимку строилась карта-схема (рис. 4б).

Однако не всегда в поле температуры воды четко выделялись вихревые структуры из-за прогрева поверхностного слоя океана, в этом случае

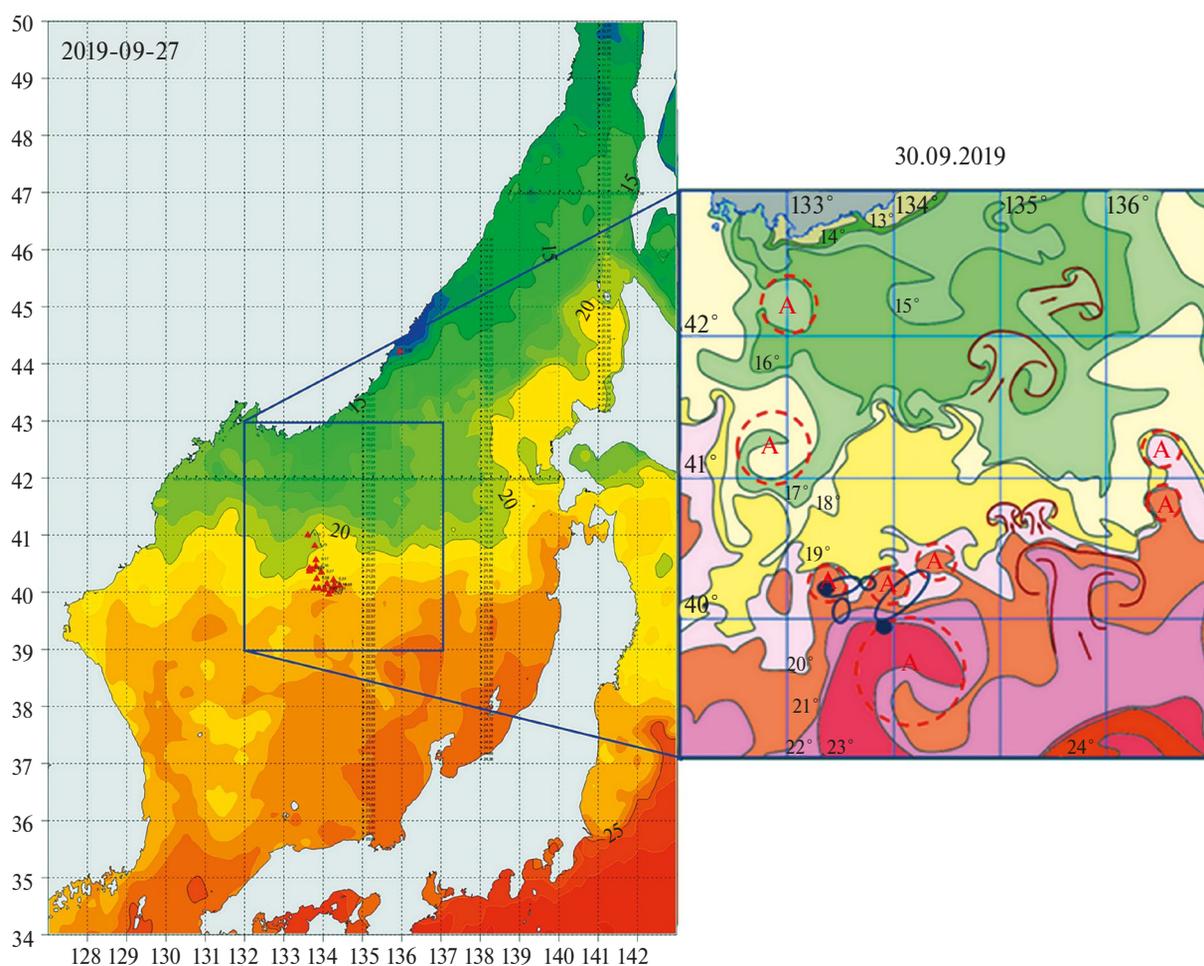


Рис. 3. Пространственное распределение температуры поверхности моря и места лова тихоокеанского кальмара (слева) (URL: <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products>) и карта-схема термической структуры вод, построенная по данным спутниковых наблюдений с районами промысла кальмара в Японском море (справа). Условные обозначения: А – антициклонический вихрь; ○ – районы уловов ТК; ● – места максимальных уловов (т).

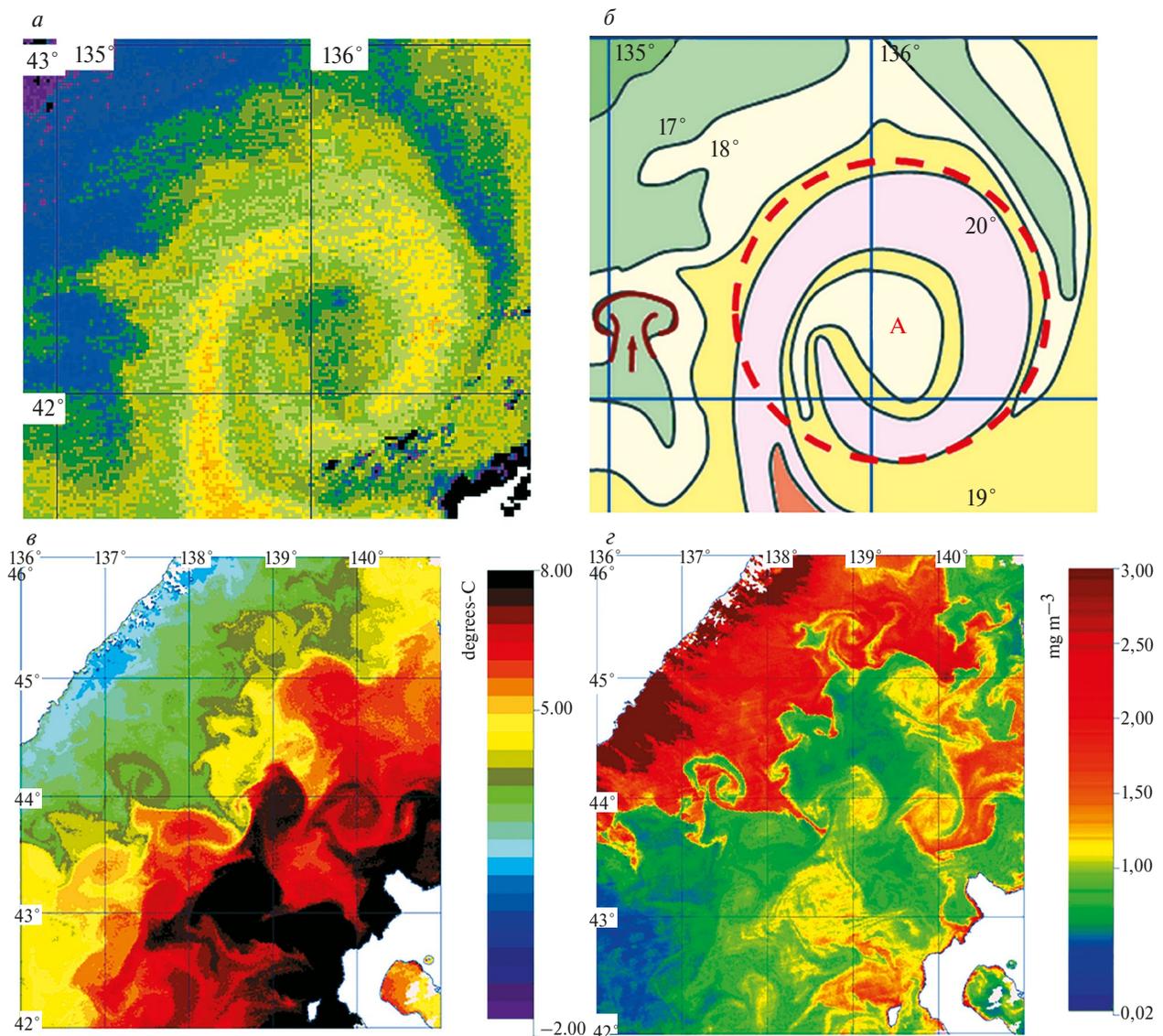


Рис. 4. Фрагмент пространственного распределения температуры поверхности моря, восстановленной по данным спутника MODIS/Terra за 19.09.2020 г. 12:38 UTC (*а*), фрагмент карты-схемы, построенной по результатам дешифрирования спутникового снимка за 19.09.2020 г. (*б*); пространственное распределение температуры поверхности моря (*в*) и хлорофилла-*а* (*г*) за 20.04.2021 г. 3:36 UTC (MODIS/Aqua).

дополнительно использовалась информация оптического диапазона спектра — пространственное распределение хлорофилла-*а* для выделения границ вихрей при построении карт-схем. Такой параметр верхнего слоя морской воды также является достаточно хорошим индикатором течений, вихревых образований, служит для характеристики водных масс. Наблюдалось обильное развитие фитопланктона в прохладных субарктических водах Приморского течения и слабое в субтропических теплых водах Цусимского течения (рис. 4*в, г*). Во фронтальной зоне при взаимодействии этих вод на спутниковых снимках наблюдается вихреобразование.

По результатам дешифрирования спутниковых снимков строились схематические карты распределения термической структуры поверхностных вод, на них наносилось положение промысловых судов. На картах места тралений с максимальным уловом обозначены заштрихованными кружками, овалами — районы, где работало несколько судов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетние спутниковые наблюдения показывают, что динамика водных масс осуществляется струйными течениями, в вершине которых образуется вихревой диполь (слева по движению цикло-

нический вихрь, справа – антициклонический). Такая когерентная структура называется грибовидным течением (Федоров, Гинзбург, 1988). Промысел тихоокеанского кальмара в июле–августе 2018–2023 гг. начинался при усилении адвекции субтропических вод с выходом тропических циклонов в зону Японского моря. Ветви Цусимского и Восточно-Корейского течений были ориентированы в северном, северо-западном направлении. Струйные течения проникали как в район залива Петра Великого (ЗПВ), так и в побережье среднего и северного Приморья, в южную часть Татарского пролива.

В начале августа 2018 г. промысел ТК в основном велся как на прибрежном фронте мористее зал. Ольги (вылов 0.55 т) при температуре 17–18°C, так и восточнее, в антициклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения (0.43 т), отходящего от основного потока Цусимского течения, при температуре 20–21°C (рис. 5а). В начале сентября 2018 г. промысловые скопления ТК (вылов до 1.7 т) отмечались в квазистационарных антициклонических вихрях. Вторжение вод Цусимского течения в юго-восточную часть Татарского пролива привело к формированию в районе о. Монерон мезомасштабного антициклонического вихря

грибовидного течения, в котором отмечен успешный лов ТК от 13 до 31 т (рис. 5б). Промысловые скопления ТК отмечались в антициклоническом вихре вблизи о. Монерон, который имел спиралевидную форму, при этом наибольший вылов 5.6 т отмечен внутри вихря при температуре 18°C. После воздействия северо-западных ветров происходило обострение прибрежного фронта, проявлялись апвеллинговые явления (рис. 5в). Вылов ТК на этом фронте составлял 5.2 т. В конце сентября 2018 г. промысел продолжался на прибрежном фронте при усилении адвекции субтропических вод. Значительный вылов 5.6 т фиксировался в циклоническом вихре образовавшегося вблизи побережья крупного диполя (рис. 5г). Другой участок промысла наблюдался юго-западнее в антициклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения на границе с субарктическими прибрежными водами. Максимальный улов был 1.7 т на “шляпке гриба”.

В первой декаде октября 2018 г. район промысла кальмара в северном Приморье оставался в потоке теплого течения в крупном антициклоническом вихре и вблизи струи, подпитывающей его (рис. 5д). Уловы составляли от 0.2 до 0.5 т. Мак-

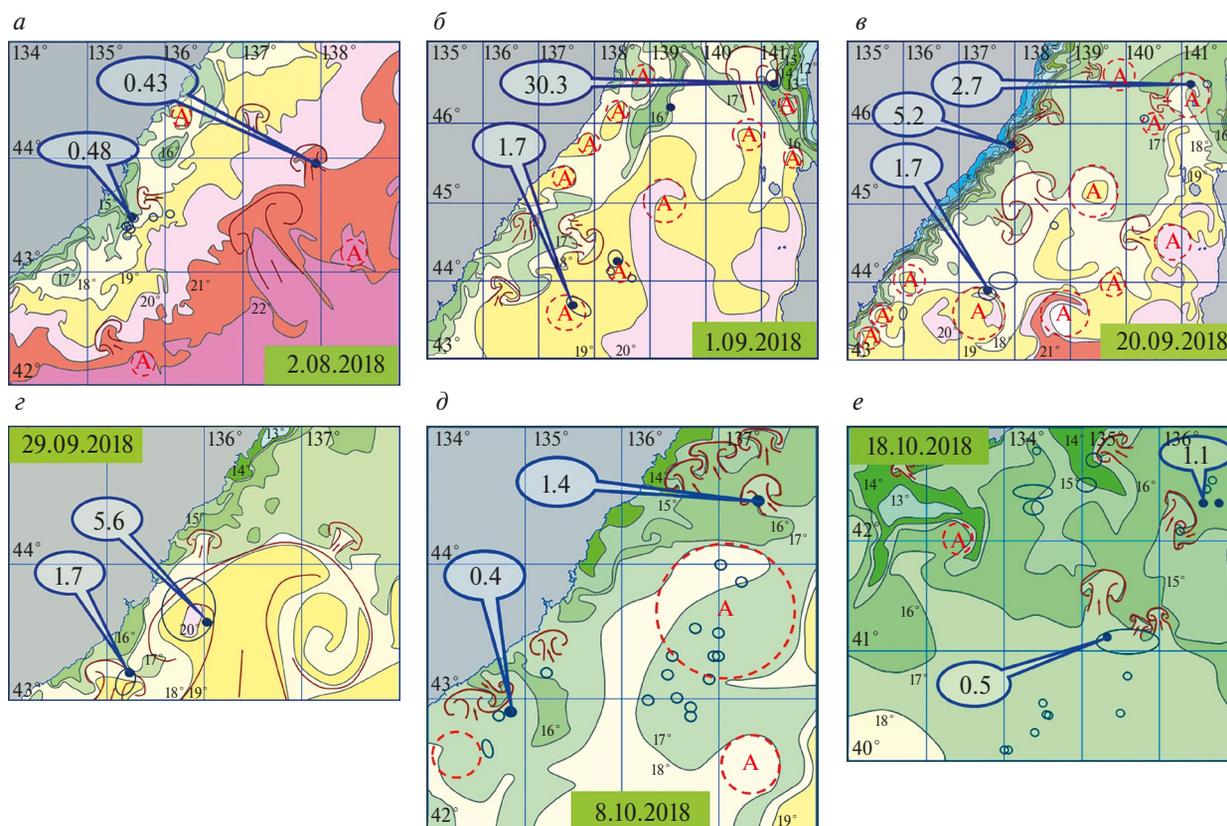


Рис. 5. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по данным спутниковых наблюдений с районами промысла кальмара в Японском море за август–октябрь 2018 г. Условные обозначения: А – антициклонический вихрь; ○ – уловы ТК (т); ● – места с максимальными уловами (т).

симальный улов 1.5 т наблюдался в циклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения, направленного к берегу в северо-западном направлении (температура воды 17°C). Уловы кальмара отмечались вблизи мезомасштабной упаковки грибовидных вихрей (максимальный улов 0.5 т) и около антициклонического вихря ближе к берегу при температуре воды 17°C. В дальнейшем районы промысла сместились в южном направлении (рис. 5е). Максимальный улов кальмара 1.1 т отмечался в водах потока с востока. Меньшие уловы (0.7 т) отмечались южнее, около 41° с.ш. В струйных течениях теплых вод (14–17°C), подходящих к побережью, уловы кальмара составляли 0.1–0.5 т.

В 2019 г. основная причина слабых подходов кальмара на нагул в прибрежные районы Приморья и Татарского пролива была связана с интенсивным Приморским течением и слабой адвекцией субтропических вод к побережью летом и осенью. Так, в начале августа 2019 г. промысел ТК велся южнее зал. Ольга на южной периферии мезомасштабного антициклонического вихря и в более теплых водах Цусимского течения (рис. 6а). Наибольший улов 0.17 т зафиксирован на “шляпке” вихревого

диполя, меньшие уловы – во фронтальной зоне. В начале сентября значительный вылов ТК в 17.4 т отмечен в районе среднего Приморья на южной периферии мезомасштабного антициклонического вихря (рис. 6б). Успешный промысел велся севернее 46° с.ш. на прибрежном фронте. В конце сентября с отступлением субтропических вод в южном направлении сместился на юг и район промысла. Промысел ТК (уловы 0.3–0.4 т) велся в морской зоне южнее зал. Находка не только в центре антициклонического вихря в вершине теплого струйного течения, но и на его северной периферии (рис. 6в). Вихрь имел спиралевидную структуру, при этом наблюдалось затекание в него относительно холодных субарктических вод. Уловы ТК, связанные с фронтальной зоной, были на северной периферии соседнего мезомасштабного вихря, которым заканчивалось струйное вторжение субтропических вод по 134° в.д. Лов же кальмара велся на северо-западной периферии мезомасштабного антициклонического вихря в вершине теплого залива субтропических вод с температурой 23°C (рис. 6г). На его северо-западной периферии был улов 0.88 т, но наибольший вылов 1.1 т отмечался в центре ме-

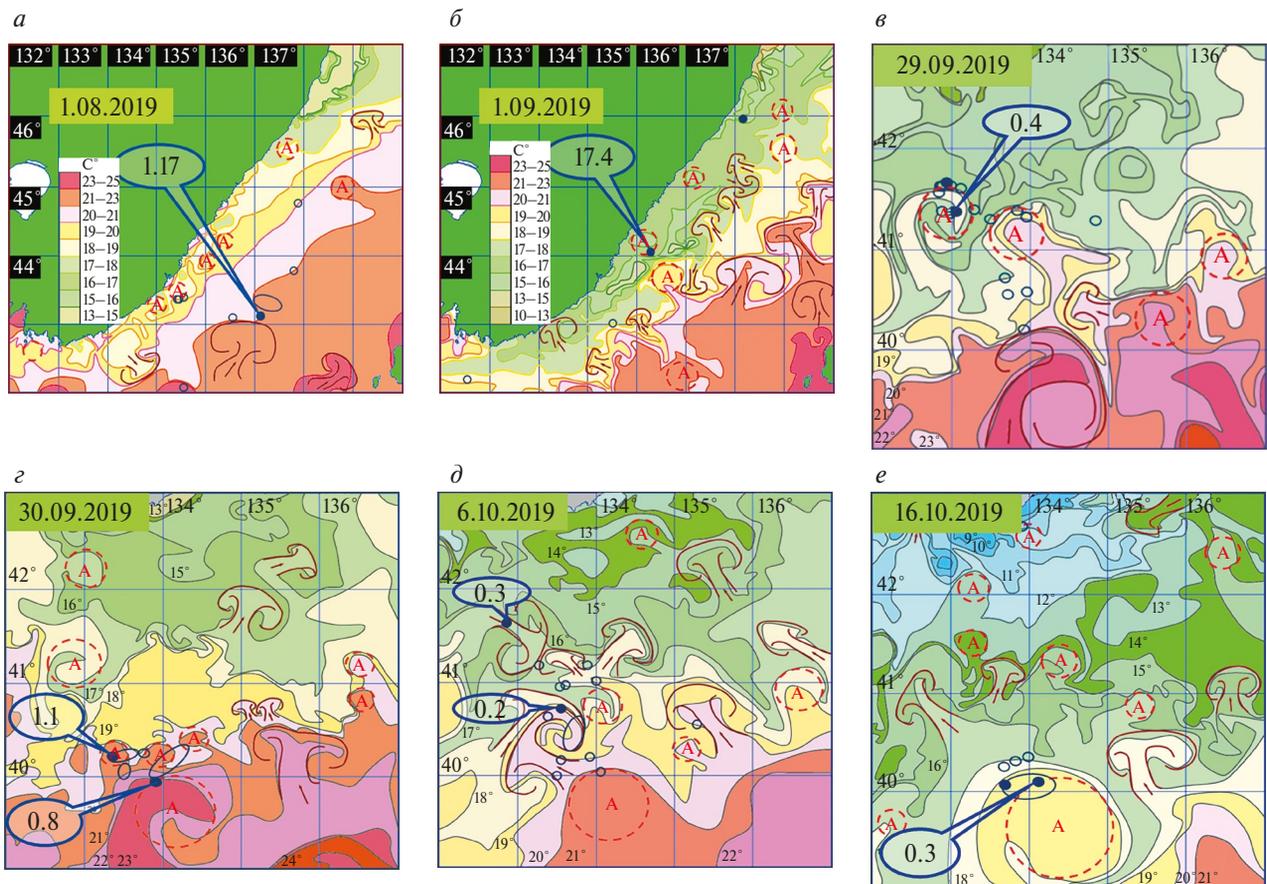


Рис. 6. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по данным спутниковых наблюдений с районами промысла кальмара в Японском море за август–октябрь 2019 г. Условные обозначения: см. рис. 5.

зомасштабного антициклонического вихря с координатами центра $40^{\circ}12'$ с.ш., $133^{\circ}25'$ в.д. Мезомасштабный антициклонический вихрь (рис. 6*д*), в котором 30 сентября отмечался максимальный улов, увеличился, проявилась его спиралевидная структура. Вихрь подпитывался водами из крупного антициклонического вихря и струйного течения с запада. Отмеченный вихрь оказался общим в упаковке двух грибовидных течений, внутри которого отмечался улов 0.22 т. Севернее в основной струе грибовидной структуры из вод Восточно-Корейского течения, вихревой диполь которого находился между 41 – 42° с.ш. по 133° в.д., вылов составил 0.3 т. Отдельные небольшие уловы были связаны с зонами взаимодействия вихрей. В середине октября общий температурный фон понизился, на северной периферии крупного антициклонического вихря при температуре 18°C вновь обнаруживались промысловые скопления (рис. 6*е*).

Гидрологические условия в 2020 г. значительно отличались от двух предыдущих лет. Летом интенсивность Приморского течения была велика, а Восточно-Корейского течения – низкой. Лишь отдельные незначительные струйные течения достигали

зал. Петра Великого. В целом районы промысла кальмара были связаны с потоками субтропических вод, антициклоническими вихрями, грибовидными течениями в их вершинах, а также в зоне взаимодействия вихревых структур. Так, в вершине теплого залива при температуре 19 – 20°C был отмечен вылов ТК 5.5 т (рис. 7*а*). На карте за 22 августа нанесены координаты участков промысла с 21 по 31 августа (рис. 7*б*). По сравнению с началом августа, адвекция теплых вод на север увеличилась, и промысел кальмара велся на прибрежном фронте, в зоне взаимодействия теплых и относительно холодных вод ЗПВ (уловы от 0.3 до 1.5 т). Большой улов 12.3 т отмечен лишь вблизи циклонического вихря грибовидного мезомасштабного течения вблизи побережья. В сентябре промысел находился в интрузиях теплых вод второй ветви Цусимского течения при температуре воды 19 – 21°C , где максимальный улов составлял 2.3 т (рис. 7*в*). Весь промысел велся между 133 – 135° в.д. в неоднородностях мористой ветви теплого потока (рис. 7*г*). Наибольший улов 4 т фиксировался в циклоническом вихре грибовидного течения, отделившегося от основного потока в северо-восточном направлении. В начале

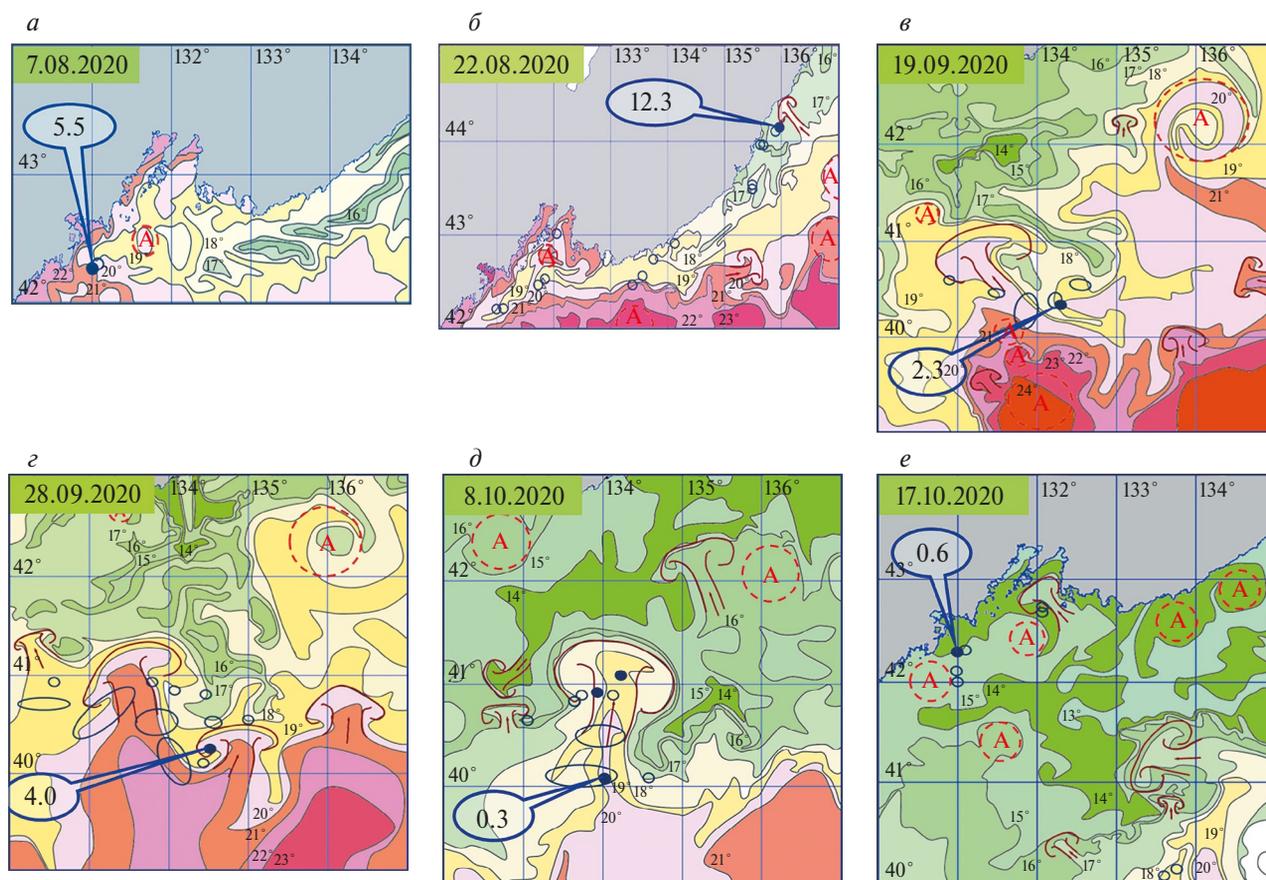


Рис. 7. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по данным спутниковых наблюдений с районами промысла кальмара в Японском море за август–октябрь 2020 г. Условные обозначения: см. рис. 5.

октября районы промысла оказывались в основной струе мористой ветви теплого течения по 134° в.д., где уловы составляли 0.3 т при температуре воды $19\text{--}20^\circ\text{C}$ (рис. 7*д*). Незначительные уловы наблюдались в циклоническом вихре образовавшегося в вершине диполя, в антициклоническом вихре мезомасштабного грибовидного течения. В середине октября небольшие уловы кальмара отмечались в ЗПВ (рис. 7*е*), при этом один район промысла находился в зоне взаимодействия установившегося антициклонического вихря с относительно теплыми водами Восточно-Корейского течения и субарктическими прибрежными водами.

Наибольший улов составил 0.6 т. Также велся промысел в южной части Уссурийского залива на периферии циклонического вихря грибовидного течения с температурой воды 15°C .

В 2021 г. промысел кальмара начался раньше, чем в предыдущие годы, потому что уже в июне были интенсивными Цусимское течение и его ветви. Основными районами промысла кальмара были: ЗПВ и мористая ветвь Цусимского течения между $133\text{--}134^\circ$ в.д. (рис. 8). В июле кальмара лови-

ли и в южной части Татарского пролива. Вторжение вод Цусимского течения в юго-восточную часть Татарского пролива привело к формированию в районе о. Монерон мезомасштабного грибовидного течения (рис. 8*а*). Промысловые скопления ТК отмечались в антициклоническом вихре вблизи о. Монерон, имеющем спиралевидную форму, при этом наибольший вылов 14.2 т отмечен на вершине “шляпки” грибовидного течения при температуре $17\text{--}18^\circ\text{C}$. В целом районы промысла были связаны с потоками субтропических вод и их взаимодействием с субарктическими водами (рис. 8*г*, *д*).

В путину 2022 г. основными районами промысла ТК был ЗПВ, его центральная и северо-восточная части (рис. 9), которые были связаны с затоками теплых вод Восточно-Корейским и мористым течениями (рис. 9*а*, *б*). Промысел в основном был отмечен в центральной части залива в затоках субтропических вод на малоградиентном фронте и в зоне мелкомасштабных вихревых образований (рис. 9*в*, *г*). В середине августа при отступлении теплых вод и ослаблении мористой ветви теплого течения на фоне усиления Приморского

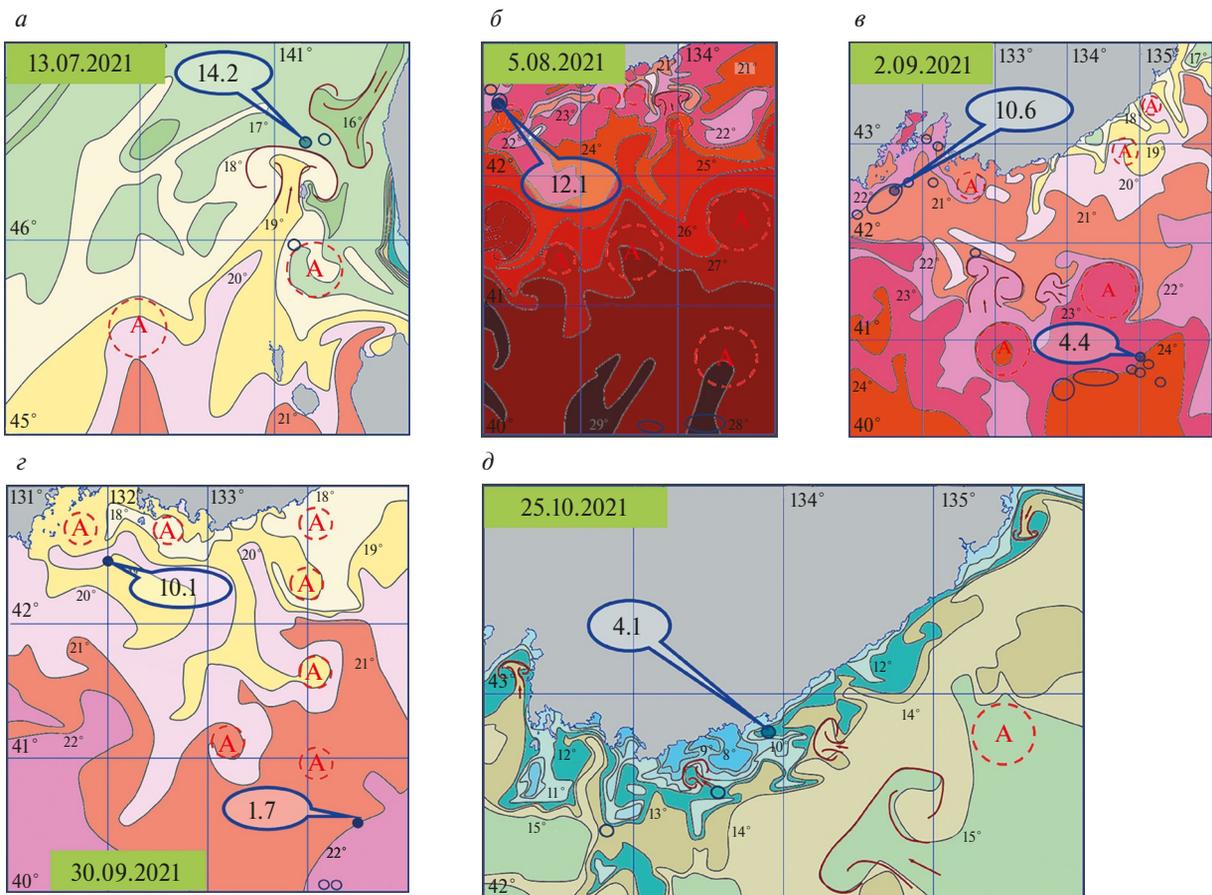


Рис. 8. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по данным спутниковых наблюдений и с районами промысла кальмара в Японском море за июль-октябрь 2021 г. Условные обозначения: (см. рис. 5).

течения лов ТК закончился. В дальнейшем подходы кальмара в ЗПВ были незначительные.

В 2023 г. промысел кальмара начался в ЗПВ в третьей декаде июля с подходом теплых вод Вос-

точно-Корейского течения в залив и их взаимодействием с водами Приморского течения, которое отличалось сильной интенсивностью (рис. 10а). Его воды занимали все побережье Приморья. Ад-

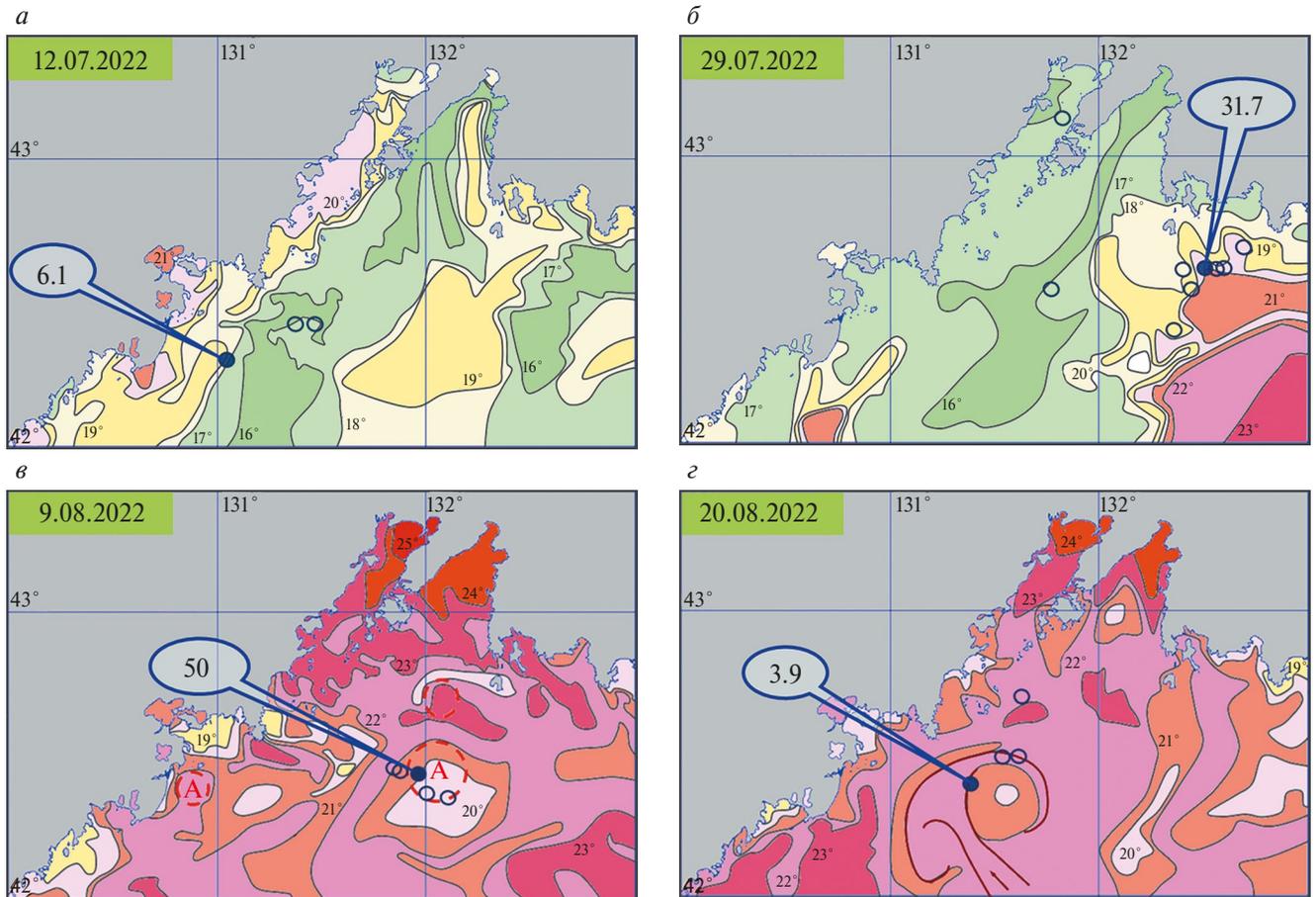


Рис. 9. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по данным спутниковых наблюдений с районами промысла кальмара в Японском море за июль-август 2022 г. Условные обозначения: (см. рис. 5).

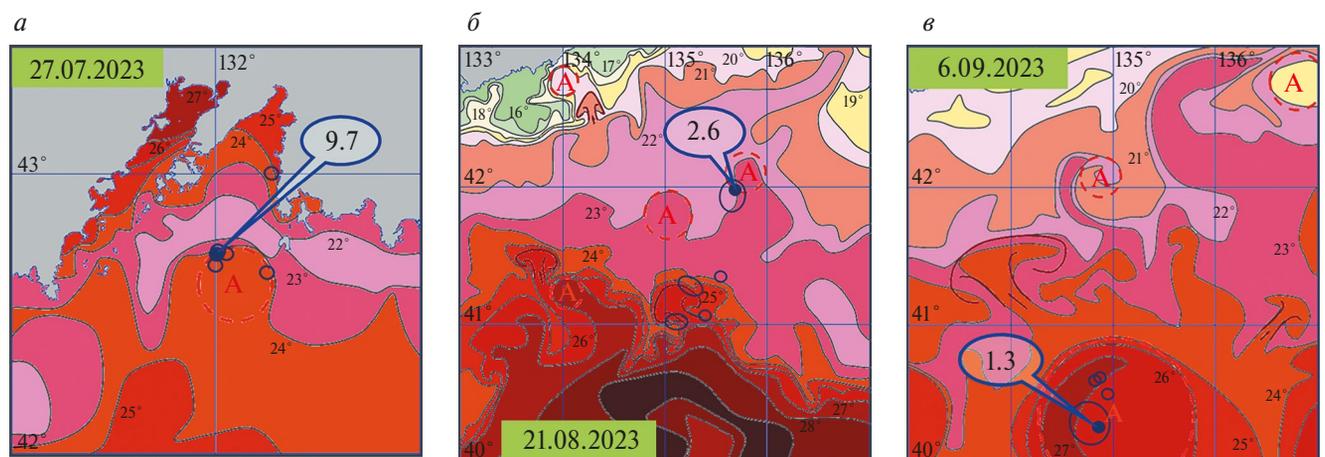


Рис. 10. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по данным спутниковых наблюдений с районами промысла кальмара в Японском море за июль-сентябрь 2023 г. Условные обозначения: (см. рис. 5).

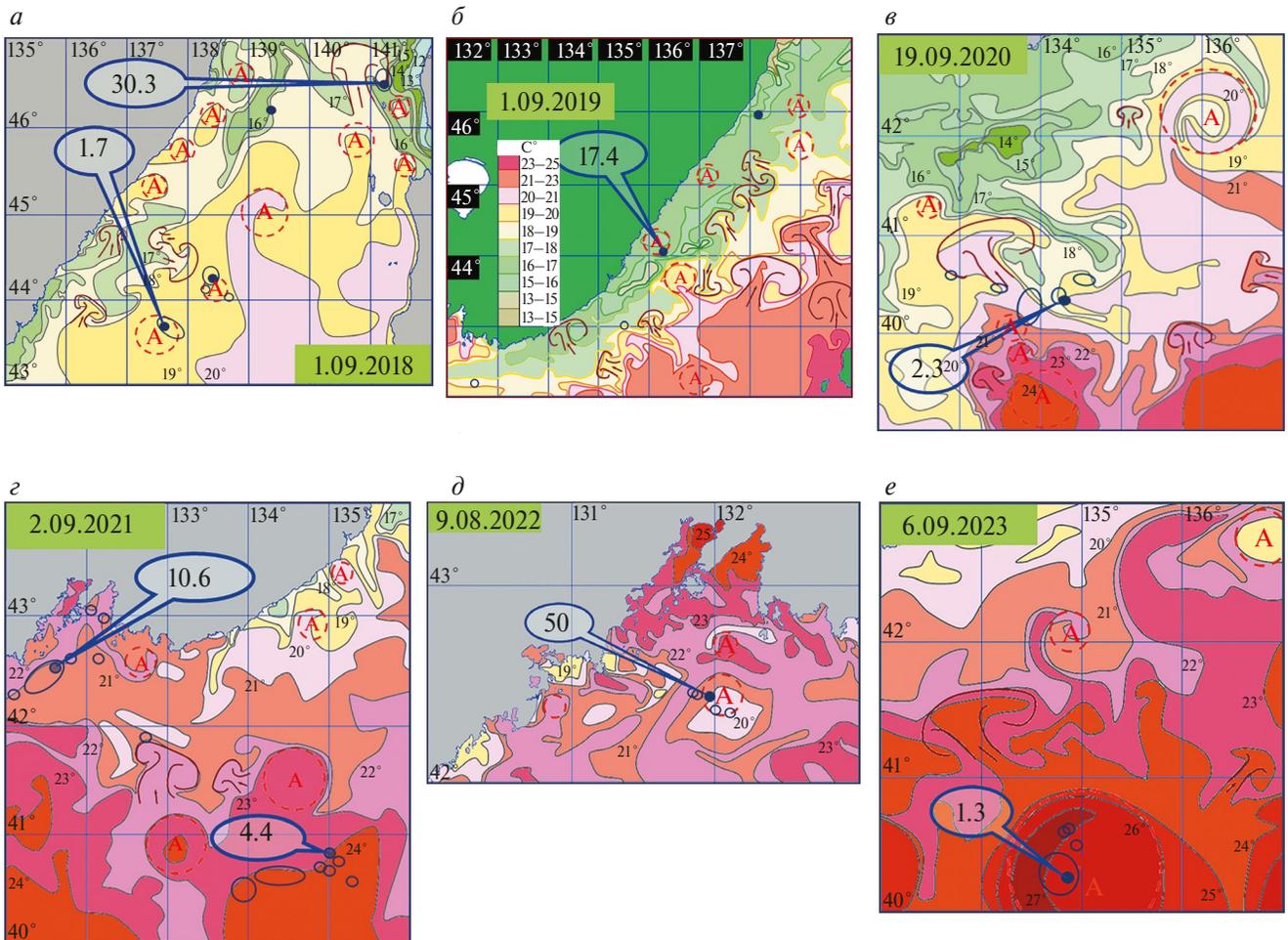


Рис. 11. Карты-схемы термической структуры вод, построенные по данным спутниковых наблюдений с районами промысла кальмара в Японском море в сентябре 2018–2023 гг. Условные обозначения: (см. рис. 5).

векция Цусимского течения была слабой. В конце августа и начале сентября российские суда продолжали лов ТК на южной границе ЗПВ в затоках теплых вод, иностранные суда вели промысел в морской зоне (40.5° с.ш., 135.2° в.д.) (рис. 10б, в).

Распределение районов промысла тихоокеанского кальмара в сентябре 2018–2023 гг. показало, что в 2018 г. скопления кальмара наблюдались в северном районе и в южной части Татарского пролива (рис. 11а). В последующие годы промысловые районы отмечались значительно южнее (рис. 11б, в, з, е). Несмотря на благоприятные гидрологические условия в Японском море, значительной миграции ТК на север не наблюдалось, что может косвенно указывать на низкую численность ТК в Японском море, поскольку в годы высокой численности районы промысла тихоокеанского кальмара достигают Татарского пролива, а годы низкого уровня запаса в лучшем случае залива Ольга, а в последние годы — залива Петра Великого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В поле пространственного распределения температуры поверхности океана определены элементы структуры вод, в которых успешно велся лов тихоокеанского кальмара. Сопоставление элементов гидрологической обстановки, дешифрованных с инфракрасных спутниковых изображений, с районами промысла позволило установить, что формирование районов промысла ТК зависело от развития или ослабления ветвей Цусимского и Приморского течений, наличия мезомасштабных вихревых структур в их водах. Скопления ТК в большинстве случаев были приурочены к районам вихревого апвеллинга. Максимальные уловы сосредоточены на периферии субтропических антициклонических вихрей, граничащих с субарктическими водами. Если вихрь имел спиралевидную структуру, то скопления в основном сосредоточены в центре вихря. Если заток субтропических вод принимал форму грибовидного течения, то крупные уловы в основном отмечались

в струе течения и в зоне антициклонического и циклонического завихрения диполя. Во фронтальной зоне субтропических и субарктических вод районы промысла кальмара находились с теплой стороны Субарктического (Полярного) фронта. Отмечено, что с уменьшением численности кальмара менялась и география районов промысла.

Данная работа выполнялась для накопления статистических данных о нахождении промысловых скоплений ТК в определенной гидрологической структуре, выявленной по спутниковым данным, и улучшения краткосрочного прогнозирования в период промысловой путины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексанин А.И., Алексанина М.Г.* Мониторинг термических структур поверхности океана по данным ИК-канала спутников NOAA на примере Прикурильского района Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Вып. 3. Том II. Москва, ООО "Азбука-2000". 2006. С. 9–15.
- Белоненко Т.В., Козуб П.К.* Вихревой апвеллинг как механизм создания благоприятных условий скоплений сайры в Южно-Курильском районе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 221–232.
- Булатов Н.В., Самко Е.В., Цытышева И.Л.* Океанологические образования, благоприятные для концентрации пелагических рыб по инфракрасным данным ИСЗ NOAA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 2. С. 49–61.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г.* Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буёв) // Исследования Земли из космоса. 1998. № 1. С. 66–83.
- Дьяков Б.С.* Влияние циркуляции вод на пространственное распределение промысловых скоплений тихоокеанского кальмара в Японском море // Изв. ТИНРО. 2003. Т. 134. С. 258–265.
- Мокрин Н.М., Слободской Е.В.* Руководство по поиску и промыслу пелагических кальмаров в Японском море и Южно-Курильском районе. Владивосток. ТИНРО-центр. 1998. 61 с.
- Мокрин Н.М., Хен Г.В.* Океанологические основы распределения, миграции и динамики численности тихоокеанского кальмара // Гидрометеорология и гидрохимия морей: Т. VIII. Японское море. Вып. 2. СПб.: Гидрометеоздат. 2004. С. 248–255.
- Никитин А.А.* Основные черты пространственного распределения фронтов в водах Японского моря и их изменчивость // Исследования Земли из космоса. 2006. № 5. С. 49–62.
- Никитин А.А., Юрасов Г.И.* Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. 2008. № 5. С. 1–16.
- Никитин А.А., Данченков М.А., Лобанов В.Б.* Пути переноса субтропических вод в район Дальневосточного Морского заповедника. / В кн.: Дальневосточный морской биосферный заповедник. Исследования. Коллективная монография. Отв. ред. А.Н. Тюрин. Т. 1. Владивосток. Дальнаука. 2004. Глава V. Гидрология и метеорология района заповедника. 2004. С. 314–319.
- Новиков Ю.В., Слободской Е.В., Шевцов Г.А.* Влияние океанологических условий на распределение и биологические особенности массовых видов кальмаров в Южно-Курильском районе // Океанология. Морская биология. 2007. Т. 47. № 2. С. 259–265.
- Савиных В.Ф., Шевцов Г.А., Карякин К.А., Слободской Е.В., Новиков Ю.В.* Межгодовая изменчивость миграций нектонных рыб и кальмаров в тихоокеанские воды южных Курильских островов // Вопросы ихтиологии. Т. 43. № 6. 2003. С. 759–771.
- Самко Е.В., Булатов Н.В.* Исследование связи положения рингов Куроисио с теплым ядром и распределения промысла сайры по спутниковым данным // Исследования Земли из космоса. № 2. 2014. С. 18–26.
- Федоров К.Н., Гинзбург А.И.* Приповерхностный слой океана // Ленинград, Гидрометеоздат. 1988. 303 с.
- Шунтов В.П.* Биология дальневосточных морей России. Владивосток: ТИНРО-Центр. Т. 2. 2016. 604 с.
- Gong Y., Jeong H.D., Suh Y.S., Park J.H., Seong K.T., Kim S.W., Choi K.H., An I.S.* Fluctuation of Pelagic Fish Populations in Relation to the Climate Shifts in the Far-East Region // J. Ecol. Field Biol. 2007. № 30 (1). P. 23–38.
- Kasahara S.* Descriptions of offshore squid angling in the Sea of Japan, with special reference to the distribution of common squid (*Todarodes pacificus* Steenstrup); and on the techniques for forecasting fishing conditions // Bull. Jap. Sea Reg. Fish. Res. Lab. 1978. Vol. 29. P. 179–199.
- Kidokoro H., Goto T., Nagasawa T., Nishida H., Akamine T., and Sakurai Y.* 2010. Impact of a climate regime shift on the migration of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) in the Sea of Japan. — ICES Journal of Marine Science, 67: 1314–1322.
- Mokrin N.M., Novikov Yu.V., Zuenko Yu.I.* Seasonal migrations and oceanographic conditions for concentration of the Japanese flying squid (*Todarodes pacificus* Steenstrup, 1980) in the northwestern Japan Sea. Bulletin of marine science. 2002. V. 71(1). P. 487–499.
- Sakurai Y., Kidokoro H., Yamashita N., Yamamoto J., Uchikawa K., Takahara H.* *Todarodes pacificus*, Japanese common squid // Rosa R., Pierce G., O'Dor R. (Eds.). Advances in squid biology, ecology and fisheries. Pt. 2: Oegopsid squids. New York: Nova Science Publishers. 2013. P. 250–270.

Structure of Water During the Feeding Migration Period of the Pacific Squid in the Sea of Japan According to Satellite Data

A. A. Nikitin¹, I. L. Tsypysheva¹, N. M. Mokrin¹

¹Pacific Branch of VNIRO (TINRO), Vladivostok, Russia

According to the sea surface temperature archive for 2018–2023, reconstructed from satellite data AQUA, TERRA (MODIS spectroradiometer), with a spatial resolution of 1 km, obtained and processed at the Center for Collective Use of the Regional Satellite Monitoring of the Environment, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, thermal and dynamic water conditions in the northwestern part of the Sea of Japan and the areas of longline (jigger) fishing for Pacific squid in the Sea of Japan are considered. Analysis of satellite materials made it possible to identify hydrological elements of the thermal structure in the field of the spatial distribution of ocean surface temperature, in which Pacific squid fishing was successfully carried out. First of all, the formation of TC fishing areas depends on the development or weakening of the branches of the Tsushima and Primorsky currents, and the presence of mesoscale eddy structures in their waters. In most cases, TC accumulations are confined to areas of eddy upwelling. Maximum catches are concentrated on the periphery of subtropical anticyclonic eddies bordering subarctic waters. If the eddy had a spiral structure, then the clusters are mainly concentrated in the center of the eddy. If the influx of subtropical waters took the form of a mushroom-shaped current, then large catches were mainly observed in the current jet and in the zone of anticyclonic and cyclonic eddy of the dipole. In the frontal zone of subtropical and subarctic waters, squid fishing areas were located on the warm side of the Subarctic (Polar) front.

Keywords: Sea of Japan, Pacific squid, satellite information, spectroradiometer, water, temperature, eddies, mushroom currents

REFERENCES

- Aleksanin A.I., Aleksanina M.G.* Monitoring termicheskikh struktur poverhnosti okeana po dannym IK-kanala sputnikov NOAA na primere Prikuril'skogo rajona Tihogo okeana // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Fizicheskie osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okružhayushchej sredy, potencial'no opasnykh yavlenij i ob"ektov.* Vyp. 3. Tom II. Moskva, OOO "Azbuka-2000". 2006. С. 9–15. (In Russian).
- Belonenko T.V., Kozub P.K.* Vihrevoj apvelling kak mekhanizm sozdaniya blagopriyatnykh uslovij skoplenij sajry v Yuzhno-Kuril'skom rajone // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018. T. 15. № 1. S. 221–232.
- Bulatov N.V., Samko E.V., Cypysheva I.L.* Okeanologicheskie obrazovaniya, blagopriyatnye dlya koncentracii pelagicheskikh ryb po infrakrasnym dannym ISZ NOAA / *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2008. T. 2. № 2. S. 49–61. (In Russian).
- Ginzburg A.I., Kostyanov A.G., Ostrovskij A.G.* Poverhnostnaya cirkulyaciya YApon'skogo morya (sputnikovaya informaciya i dannye dreyfuyushchih buyov) // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 1998. № 1. S. 66–83. (In Russian).
- D'yakov B.S.* Vliyanie cirkulyacii vod na prostranstvennoe raspredelenie promysl'ovyykh skoplenij tihookeanskogo kal'mara v YApon'skom more // *Izv. TINRO*. 2003. T. 134. S. 258–265. (In Russian).
- Mokrin N.M., Slobodskoj E.V.* Rukovodstvo po poisku i promyslu pelagicheskikh kal'marov v YApon'skom more i Yuzhno-Kuril'skom rajone. Vladivostok. TINRO-centr. 1998. 61 s. (In Russian).
- Mokrin N.M., Hen G.V.* Okeanologicheskie osnovy raspredeleniya, migracii i dinamiki chislennosti tihookeanskogo kal'mara // *Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej*: T. VIII. Yaponskoe more. Vyp. 2. SPb.: Gidrometeoizdat. 2004. S. 248–255. (In Russian).
- Nikitin A.A.* Osnovnye cherty prostranstvennogo raspredeleniya frontov v vodah Yaponskogo morya i ih izmenchivost' // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 2006. № 5. S. 49–62. (In Russian).
- Nikitin A.A., Yurasov G.I.* Sinopticheskie vihri YApon'skogo morya po sputnikovym dannym // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2008. № 5. S. 1–16. (In Russian).
- Nikitin A.A., Danchenkov M.A., Lobanov V.B.* Puti perenosa subtropicheskikh vod v rajon Dal'nevostochnogo Morskogo zapovednika. / V kn.: *Dal'nevostochnyj morskoy biosfernyj zapovednik. Issledovaniya. Kollektivnaya monografiya.* Otv. red. A.N. Tyurin. T. 1. Vladivostok. Dal'nauka. 2004. Glava V. Gidrologiya i meteorologiya rajona zapovednika. 2004. S. 314–319. (In Russian).
- Novikov Yu.V., Slobodskoj E.V., Shevcov G.A.* Vliyanie okeanologicheskikh uslovij na raspredelenie i biologicheskie osobennosti massovykh vidov kal'marov v Yuzhno-Kuril'skom rajone // *Okeanologiya. Morskaya biologiya*. 2007. T. 47. № 2. S. 259–265. (In Russian).
- Savinyh V.F., Shevcov G.A., Karyakin K.A., Slobodskoj E.V., Novikov Yu.V.* Mezhdogovaya izmenchivost' migracij nektonnykh ryb i kal'marov v tihookeanskije vody yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov // *Voprosy ihtologii*. T. 43. № 6. 2003. S. 759–771. (In Russian).
- Samko E.V., Bulatov N.V.* Issledovanie svyazi polozheniya ringov Kuroshio s teplym yadrom i raspredeleniya promysla sajry po sputnikovym dannym // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. № 2. 2014. S. 18–26. (In Russian).
- Fedorov K.N., Ginzburg A.I.* Pripoverhnostnyj sloj okeana // Leningrad, Gidrometeoizdat. 1988. 303 s. (In Russian).
- Shuntov V.P.* Biologiya dal'nevostochnykh morej Rossii. Vladivostok: TINRO-Centr. T. 2. 2016. 604 s. (In Russian).

- Gong Y., Jeong H.D., Suh Y.S., Park J.H., Seong K.T., Kim S.W., Choi K.H., an I.S.* Fluctuation of Pelagic Fish Populations in Relation to the Climate Shifts in the Far-East Region // *J. Ecol. Field Biol.* 2007. № 30 (1). R. 23–38.
- Kasahara S.* Descriptions of offshore squid angling in the Sea of Japan, with special reference to the distribution of common squid (*Todarodes pacificus* Steenstrup); and on the techniques for forecasting fishing conditions // *Bull. Jap. Sea Reg. Fish. Res. Lab.* 1978. Vol. 29. P. 179–199.
- Kidokoro H., Goto T., Nagasawa T., Nishida H., Akamine T., and Sakurai Y.* 2010. Impact of a climate regime shift on the migration of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) in the Sea of Japan. – *ICES Journal of Marine Science*, 67: 1314–1322.
- Mokrin N.M., Novikov Yu.V., Zuenko Yu.I.* Seasonal Migrations and oceanographic conditions for concentration of the Japanese flying squid (*todarodes pacificus* steenstrup, 1980) in the northwestern Japan Sea. *Bulletin of marine science.* 2002. V. 71(1). P. 487–499.
- Sakurai Y., Kidokoro H., Yamashita N., Yamamoto J., Uchikawa K., Takahara H.* *Todarodes pacificus*, Japanese common squid // *Rosa R. Pierce G. O'Dor R. (eds.). Advances in squid biology, ecology and fisheries. Pt. 2: Oegopsid squids.* New York: Nova Science Publishers. 2013. R. 250–270.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СЕЗОННЫЕ И МЕЖГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА В РАЙОНЕ СЕВЕРНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2025 г. Г. В. Шевченко^{1,2,*}, Ж. Р. Цхай¹, Д. М. Ложкин¹

¹Сахалинский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («СахНИРО»), Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: shevchenko_zhora@mail.ru

Поступила в редакцию 06.05.2024 г.

Проанализированы средние месячные значения температуры поверхности океана в районе северных Курильских островов за 1998–2022 гг. На основе 25-летнего ряда наблюдений для каждого месяца построены нормы – средние многолетние распределения. Показано, что на прибрежном участке акватории от о. Симушир до Четвертого Курильского пролива в летний период формируется область холодного пятна с очень низкими температурами (около 6°C) и малыми амплитудами годового хода (около 3°C). Сезонные колебания характеризуются годовым ходом с максимальными значениями в августе–сентябре и минимальными в феврале–марте. В целом по району они хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 4.9 и 1.1°C соответственно. Межгодовая изменчивость отражена в вариациях летних максимумов с периодом около шести лет. В летне-осенний период вне области холодного пятна отмечается устойчивый тренд к повышению температуры, наиболее значимый в северо-западной части Тихого океана (около 1°C за 25 лет). В зимне-весенний сезон в Охотском море наблюдается обратная ситуация с тенденцией на снижение термических показателей. При расчете отклонений средних месячных температур от нормальных величин выявлено, что в районе Северных Курил возможно формирование масштабных зон со значительными температурными аномалиями, преимущественно отрицательными, которые могут представлять серьезную опасность для гидробионтов.

Ключевые слова: термический режим, аномалии температуры, линейный тренд, гармонический анализ, метод естественных ортогональных функций, п-ов Камчатка, Охотское море, северо-западная часть Тихого океана

DOI: 10.31857/S0205961425010078, EDN: DIECFP

ВВЕДЕНИЕ

Акватория, прилегающая к северным Курильским островам и юго-восточной Камчатке, имеет важнейшее промысловое значение. Здесь вылавливается значительное количество промысловых видов рыб и беспозвоночных – тихоокеанские лососи, минтай, треска, сельдь, навага, камбалы, крабы (камчатский, синий, стригун бэрди) и т.п. По этой причине исследование особенностей гидрологического режима данной акватории, сезонной и межгодовой изменчивости океанологических условий представляет значительный интерес.

Сравнительно немногочисленные исследования основаны преимущественно на результатах судовых океанологических съемок (Копо, Kawasaki, 1997; Кантаков, 2000; Самко, Новиков, 2004). Существенно больше работ посвящено более обширной акватории северо-западной части Тихого

океана (СЗТО), в которых проанализирован широкий спектр данных, включая метеорологическую информацию (Joyce, Dunworth-Baker, 2003; Хен и др., 2004; Рогачев, Шлык, 2005; Глебова и др., 2009; Бышев и др., 2016; Ростов и др., 2020, 2021; Цхай и др., 2022). Ряд работ посвящен климатическим изменениям в Охотском море (Гидрометеорология..., 1998; Хен и др., 2008, 2022; Ростов и др., 2017; Зуенко и др., 2019; Ложкин, Шевченко, 2019, 2022). В своей статье В.И. Бышев с соавторами (2016) констатировали весьма сложный характер термических вариаций в СЗТО.

Аналогичный вывод можно сделать и в отношении Охотского моря, где, по материалам океанологических зондирований, отмечались повышение теплосодержания в различных слоях, уменьшение глубины зимней конвекции и интенсивности геострофических потоков (Зуенко и др., 2019). Этот вывод относился преимущественно к восточной

части бассейна, где исследования “ТИНРО” *in situ* наиболее детальны. В то же время, по данным спутниковых наблюдений, в западной части Охотского моря наблюдалось устойчивое снижение температуры поверхностного слоя зимой и весной (Ложкин, Шевченко, 2019), что связывалось авторами с увеличением глубины зимней конвекции вследствие уменьшения ледовитости. Эти особенности определяют интерес к изучению термического режима акватории, прилегающей к северным Курильским островам.

Из-за большой удаленности этого района сбор океанологической информации был выполнен “СахНИРО” всего три раза – весной 2013, 2015 и 2016 гг., в режиме сопровождения ихтиопланктонных съемок, что не позволило рассмотреть особенности термического режима на основе материалов экспедиционных зондирований.

В отличие от традиционных судовых съемок, спутниковые наблюдения за температурой поверхности океана (ТПО) отличаются полным охватом акватории и регулярностью поступления данных. Поэтому они являются наиболее подходящим материалом для характеристики пространственно-временных колебаний ТПО в современных условиях, когда количество морских экспедиций сокращается.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В “СахНИРО” накоплен значительный объем спутниковых наблюдений по температуре поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий благодаря установленной в 1997 г. приемной спутниковой станции TeraScan® (<https://www.seaspace.com>). С 1998 г. налажены регулярный прием поступающей информации и формирование базы данных, основой которых являются суточные распределения ТПО с пространственным разрешением около 2 км.

В этом исследовании использовались среднемесячные данные ТПО за 1998–2022 гг. (25 лет) в области, ограниченной координатами 47–52° с.ш. и 152–160° в.д. (рис. 1). Исходная матрица состояла из 300 временных слоев размерностью 285×284 точки. Для каждого месяца и пространственной ячейки были вычислены средние многолетние значения, которые рассматривались как нормы, характеризующие типичные параметры термического режима, и среднеквадратические отклонения σ . Аномалии как разность текущих среднемесячных значений и нормы считались значительными, если по абсолютной величине превышали удвоенную величину σ (Цхай, Шевченко, 2013).

Для определения характера межгодовых колебаний ТПО использовано разложение исходной

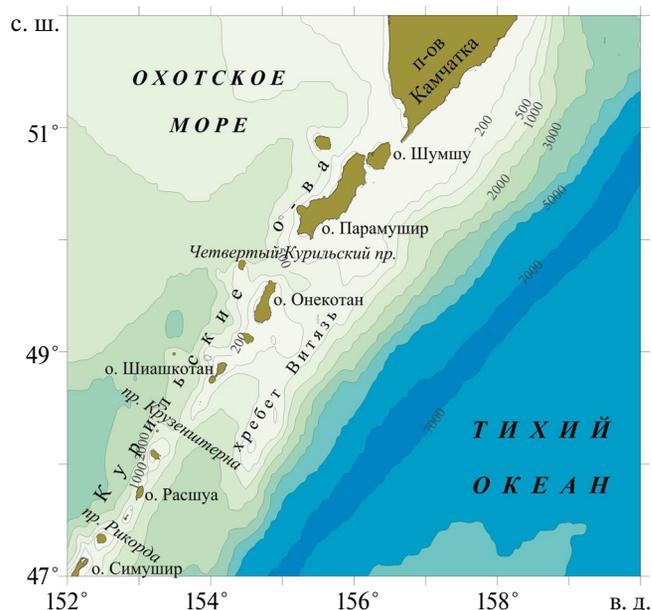


Рис. 1. Карта района исследований.

матрицы по естественным ортогональным функциям (Багров, 1959). При анализе сезонных вариаций температур методом наименьших квадратов получены амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник. Аналогичный расчет выполнен и для усредненных по всей акватории значений. Также во всех точках пространства вычислены коэффициенты линейного тренда (КЛТ), характеризующие однонаправленные тенденции в межгодовых изменениях ТПО (Ложкин, Шевченко, 2019). При оценке вклада циклических составляющих рассчитаны амплитуда и фаза гармоники с заданным периодом по выборкам за август (огнивающая по максимумам). Далее эта компонента вычиталась из исходного ряда, значимость вклада гармоники определялась по отношению дисперсии остаточного ряда к дисперсии исходного, просуммированных по всей акватории. Периоды циклических компонент задавались от трех до 12 лет с шагом три месяца (Ложкин, Шевченко, 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среднемесячные распределения ТПО. На рис. 2 представлены средние многолетние распределения температуры поверхности океана в районе северных Курильских островов. В январе–марте наблюдаются наиболее холодные условия, характеризующие, как и в других дальневосточных морях, а также прилегающей к ним части Тихого океана, зимний термический режим (Гидрология и метеорология..., 1998). В этот период на большей части акватории значения ТПО колеблются в пределах от

0 до $+2^{\circ}\text{C}$. На шельфе островов Шумшу и Парамушир, а также у юго-восточного побережья Камчатки они опускаются ниже нуля. В целом в охотоморских водах температура ниже, чем в Тихом океане.

В апреле весенние процессы прогрева поверхностного слоя едва заметны, исчезает зона отрицательных температур над материковым склоном юго-восточной Камчатки и самых северных Курильских островов. В мае в прикурильских водах значения ТПО увеличиваются до $+2^{\circ}\text{C}$, а на остальной акватории – до $+3^{\circ}\text{C}$. Повышение термических показателей становится ощутимым только в июне, большая часть акватории прогревается до $+5\text{--}6^{\circ}\text{C}$,

но в это же время у Курильских островов южнее о. Парамушир начинает формироваться область с более низкими температурами – от $+3$ до $+4^{\circ}\text{C}$.

В летние месяцы особенности пространственного распределения ТПО в целом имеют те же черты, что и в июне: наиболее холодная вода отмечается в прикурильских водах южнее 50° с.ш., значения температуры возрастают по мере удаления от островов как в открытый океан, так и в Охотское море. Наиболее широкая область холодной воды наблюдается вблизи о. Шиашкотан, где возникает второе пятно в районе резко выраженного северного отрога хребта Витязь. Эта особенность под-

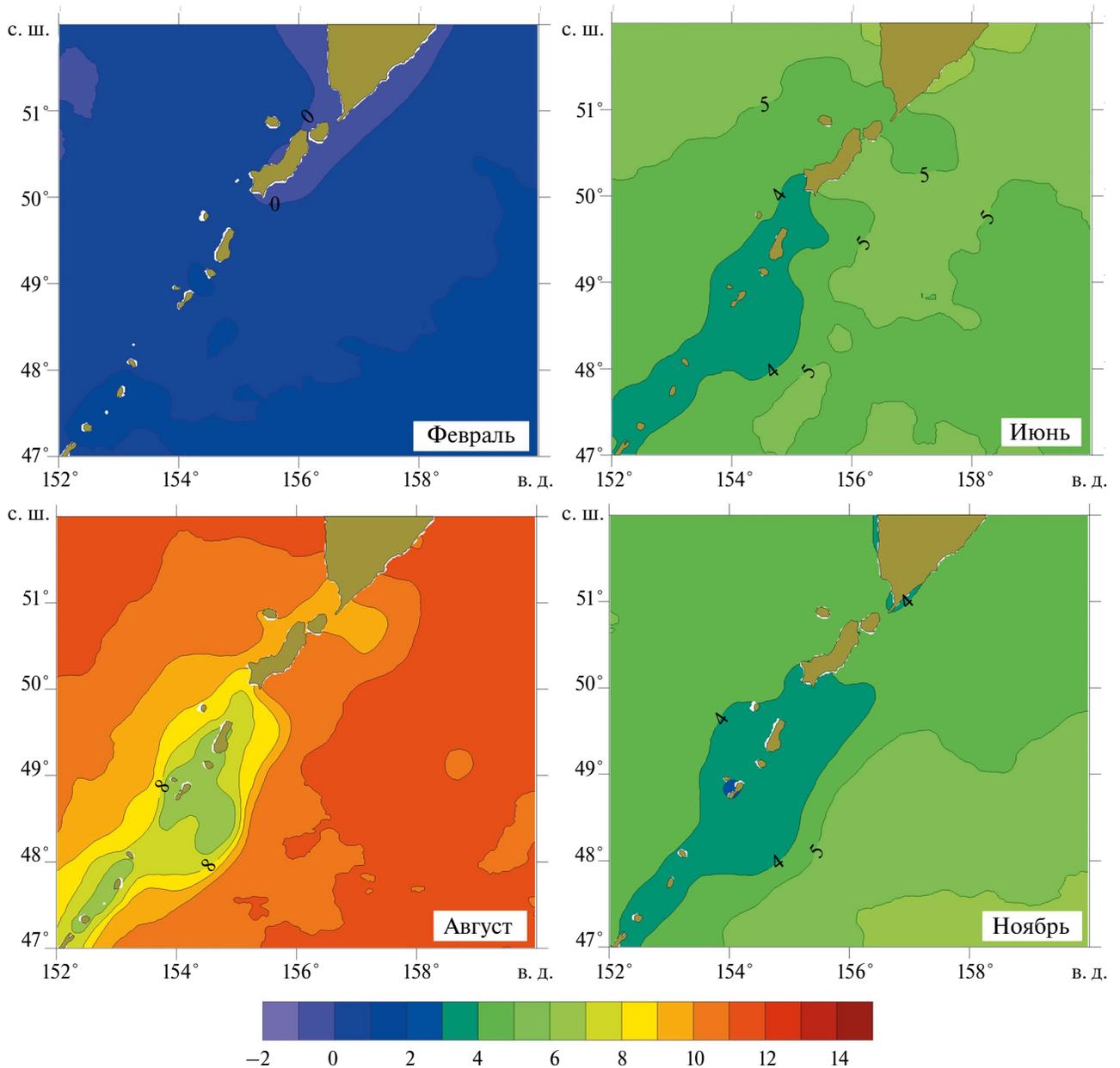


Рис. 2. Среднее многолетнее распределение ТПО (в $^{\circ}\text{C}$) в районе северных Курильских островов зимой (февраль), весной (июнь), летом (август) и осенью (ноябрь).

черкивает определяющую роль донного рельефа в возникновении холодной зоны в этой части Курильской гряды, охватывающей участок от о. Си-мушир до Четвертого Курильского пролива.

В июле, как и в июне, наиболее теплая вода (+9–10°C) находится преимущественно к северу от 51-й параллели, а у западной границы изучаемого района она распространяется на юг до 50° с.ш. На основной части акватории значения ТПО варьируются в довольно узких пределах – +8–9°C. По мере приближения к Курильским островам увеличивается градиент температур, в прибрежных районах отмечается более холодная вода (ниже 6°C). В августе–сентябре у побережья показатели остаются прежними, в то время как на остальной акватории они увеличиваются до 10–12°C.

В октябре–ноябре распределение температур аналогично летнему. В октябре в областях с самой теплой водой на северо-западе и юго-востоке акватории температура воды снижается наиболее быстро – до 8–9°C. В наименьшей степени выхолаживается акватория вблизи островов, где минимальные значения опускаются до 4°C. В ноябре на большей части акватории температура не превышает 4–6°C. Пространственное распределение ТПО существенно преобразуется в декабре, когда в результате выхолаживания поверхностного слоя оно становится более однородным и область вблизи островов уже не выделяется. Термические показатели на прибрежных участках снижаются до 1–2°C, в мористых районах – до 3°C.

Динамика средних месячных значений ТПО представлена на рис. 3. В этих колебаниях доминирует годовой ход и отчетливо видны межгодо-

вые вариации, которые выражены прежде всего в огибающей как по максимумам, так и по минимумам (хотя для температуры морской воды существенные изменения последних менее характерны). Отмечается также и однонаправленная тенденция к росту ТПО, причем в последние годы она явно усиливается. Если в целом по всему ряду коэффициент линейного тренда составляет около 0.04 °C/год, что означает повышение на 1°C за 25 лет, то по расчету за последние семь–восемь лет он почти на порядок выше (около 0.3°C/год).

На графике просматриваются хорошо выраженные вариации термических условий в летний период (огибающая по максимумам). В 1998, 2006, 2012, 2016 и 2022 гг. в акваториях, прилегающих к северным Курильским островам, наблюдались условия существенно более теплые, чем в “обычные” годы, когда температура воды близка к средним многолетним значениям. Холодные условия отмечены в 2002, 2009, 2014 и 2019 гг., различия в средних по районам значениях ТПО достигали 3.5°C.

В вариациях максимумов ТПО прослеживаются квазиритмические составляющие. Наименьшая доля остаточной дисперсии была получена для гармоник с периодом шесть лет. Значение амплитуды этой составляющей было близко к 1°C, наиболее высокие значения зафиксированы в южной части изучаемой области (до 1.7°C), самые низкие – на юго-восточном шельфе Камчатки и на океанском шельфе северных Курильских островов.

Сезонные вариации ТПО. В таблице 1 приведены статистические характеристики сезонных вариаций: средние многолетние значения ТПО для каждого месяца, величина среднеквадратического

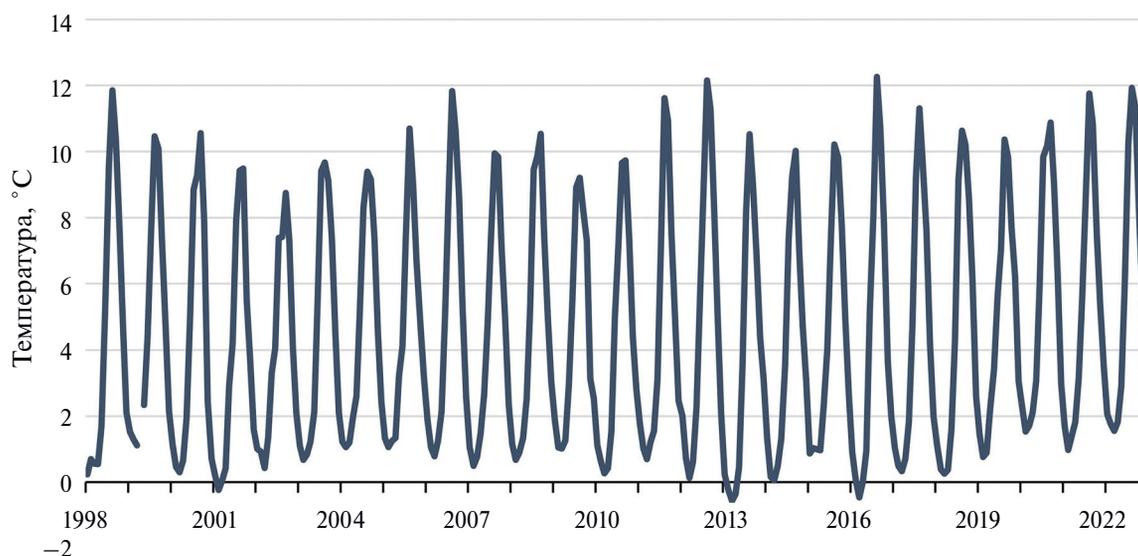


Рис. 3. График вариаций ТПО (в °C), усредненных по акватории у северных Курильских островов.

отклонения σ , максимальные и минимальные значения за весь период наблюдений. Максимальный прогрев отмечается в августе (10.4°C) и сентябре (10.0°C), минимальный – в феврале–марте (0.7°C).

Таблица 1. Средние многолетние значения, среднеквадратическое отклонение σ и экстремальные значения ТПО по месяцам (°C)

Месяц	Среднее	Сигма	Минимум	Максимум
Январь	1.3	0.6	0.2	2.3
Февраль	0.7	0.5	-0.2	1.8
Март	0.7	0.6	-0.6	1.7
Апрель	1.1	0.7	-0.4	2.2
Май	2.3	0.8	0.5	3.4
Июнь	4.8	0.8	3.1	6.0
Июль	8.4	0.9	7.1	10.2
Август	10.4	1.2	7.4	12.3
Сентябрь	10.0	0.8	8.2	11.3
Октябрь	7.5	0.7	5.5	9.0
Ноябрь	4.7	0.9	2.5	6.3
Декабрь	2.5	0.6	0.7	3.5

Колебания хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник. Годовой ход выражен сравнительно слабо, амплитуда годовой составляющей равнялась 4.9 °C, а ее фаза – 224°, что отвечает максимуму в середине августа. Амплитуда полугодовой гармоники в четыре раза меньше (1.1 °C), а ее фаза соответствует максимумам в начале февраля и августа. Амплитуда годовой гармоники существенно отличалась в разные годы – наименьшее значение отмечено в холодном 2002 г. (4.0°C), наибольшее – в теплом 2016 г. (5.8°C).

Рассмотрим пространственные распределения амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник за период с 1998 до 2022 г. (рис. 4). Из рисунков следует, что интенсивность сезонных вариаций ТПО изменяется не только во времени, но и в пространстве. На большей части акватории как в СЗТО, так и в Охотском море амплитуда годовой гармоники колеблется от 5 до 6°C. По мере приближения к островам Курильской гряды ее значения уменьшаются и достигают минимальных значений (от 2.3 до 2.6°C) на участках от о. Онекотан до о. Шиащкотан и от о. Расшуа до о. Симушир. Фаза годовой гармоники варьируется в небольших пределах – от 214 до 234°. Ее минимальные значения, означающие несколько более раннее наступление летнего температурного максимума, наблюдаются вблизи Курильских островов и на шельфе полуострова Камчатка, максимальные – на юго-востоке изучаемого района.

Вариации амплитуды полугодовой составляющей невелики, ее значения возрастают от 0.7°C в прибрежной зоне Курильских островов до 1.4°C на других участках. Фаза этой компоненты также минимальна в прибрежной зоне архипелага и на юго-восточном шельфе Камчатки (около 42°), а по мере удаления в Тихий океан увеличивается до 95°.

Межгодовая изменчивость термических условий. В современных условиях, когда главную роль в изменениях климата на Земле играет глобальное потепление, при изучении вариаций термических условий в морских акваториях наиболее часто возникает вопрос о наличии в них однонаправленных тенденций (трендов). На рис. 5 представлены результаты вычислений для различных сезонов года, где коэффициенты линейного тренда приведены к значениям за 10 лет.

Характер пространственного распределения КЛТ зимой (январь–март) достаточно сложный и мозаичный, но в целом в Охотском море преобладает тенденция к снижению ТПО, а в СЗТО, наоборот, – к повышению. Наиболее значительные отрицательные тренды отмечены вдоль западной границы района (до 0.5°C/10 лет или 1°C за 20 лет). Скорость роста в прилегающей к Курильским островам части Тихого океана примерно вдвое меньше.

Весной область с отрицательными значениями КЛТ расширяется за счет существенной части СЗТО, положительные тенденции наблюдаются только на северо-восточном участке, примыкающем к юго-восточному побережью Камчатки. При этом скорость снижения ТПО уменьшается по сравнению с зимним периодом, а скорость повышения возрастает до 0.4°C/10 лет.

Летом на большей части акватории преобладает тренд к потеплению, причем в открытом океане скорости роста очень велики – до 1.1°C/10 лет. Исключением является отмеченное выше холодное пятно у побережья Курильских островов, где наблюдается падение ТПО, причем с достаточно высокими скоростями (от 0.2 до 0.4°C/10 лет). Осенью преобладает тенденция к повышению температуры поверхностного слоя воды, скорость роста колеблется от 0.3 до 0.7°C/10 лет, которую также можно считать значительной.

Значимые аномалии ТПО. По сути, показанные выше теплые и холодные годы – это визуальные оценки. В то же время выявление масштабных как по величине, так и по площади акватории аномалий ТПО (отклонений от средних многолетних значений, называемых “нормами”) представляет значительный интерес. Обычно отклонения от нормы подчиняются нормальному распределению, для которого величина 2σ соответствует

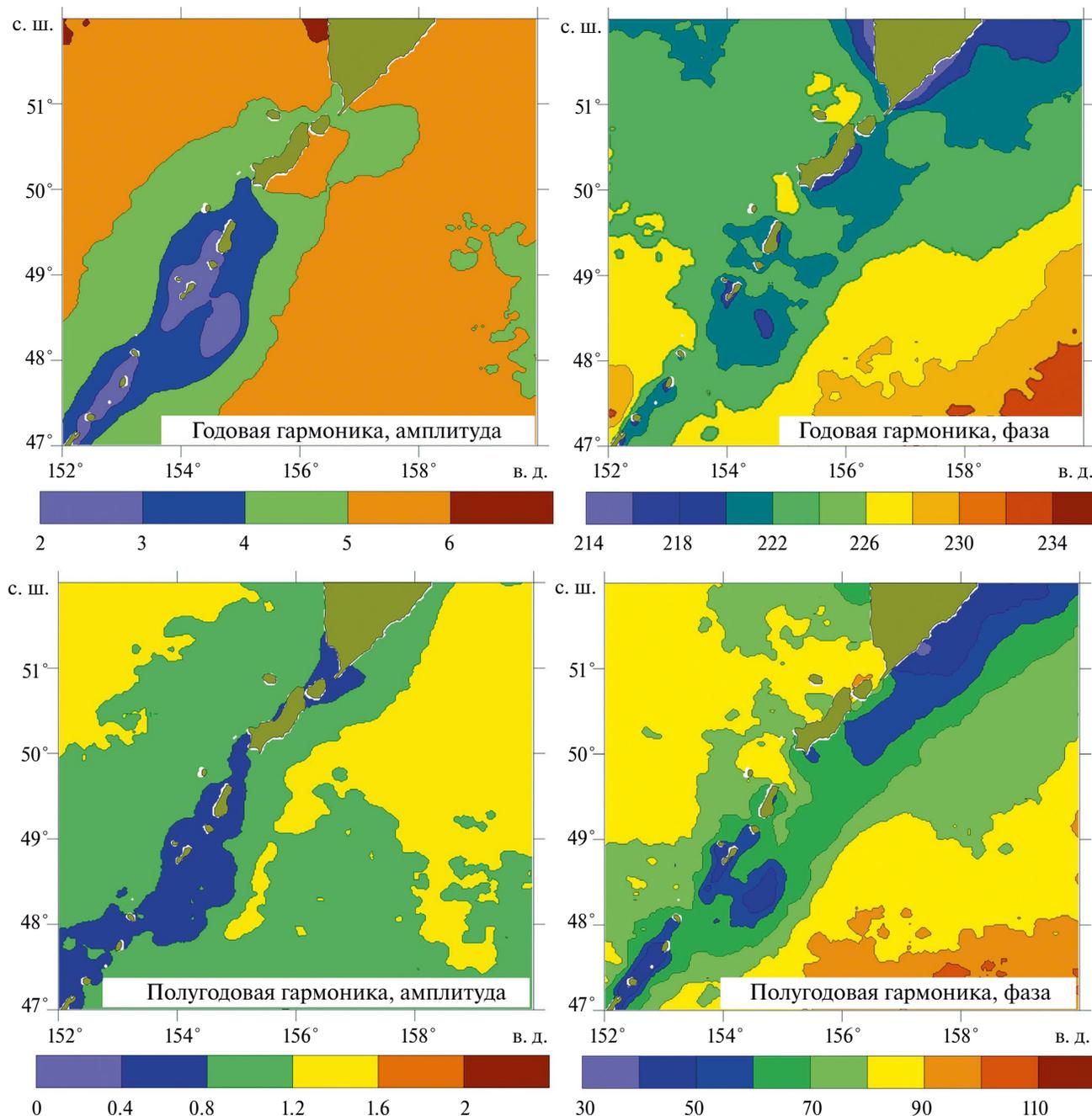


Рис. 4. Пространственное распределение амплитуды (в °С) и фазы (в °) годовой и полугодовой гармоник ТПО в районе северных Курильских островов.

границе, в пределах которой лежат 95% значений, и выход за ее пределы свидетельствует об экстраординарных термических условиях (некоторые специалисты даже используют термин “thermic catastrophe”) окружающей среды (Ustinova, 2021). Если такие аномалии распространяются на обширную часть акватории, то ситуация становится действительно опасной для жизни гидробионтов, особенно на ранней стадии их развития, и заслуживает внимательного изучения. На рисунке 6

представлен график, на котором отложена доля площади значимых аномалий по отношению ко всей изучаемой области.

Наибольший интерес представляли ситуации, когда такие аномалии занимали значительную часть изучаемого бассейна. В большинстве случаев они проявлялись на небольших участках, составлявших 2–5% от площади изучаемой акватории, и сравнительно редко превышали отметку 10%.

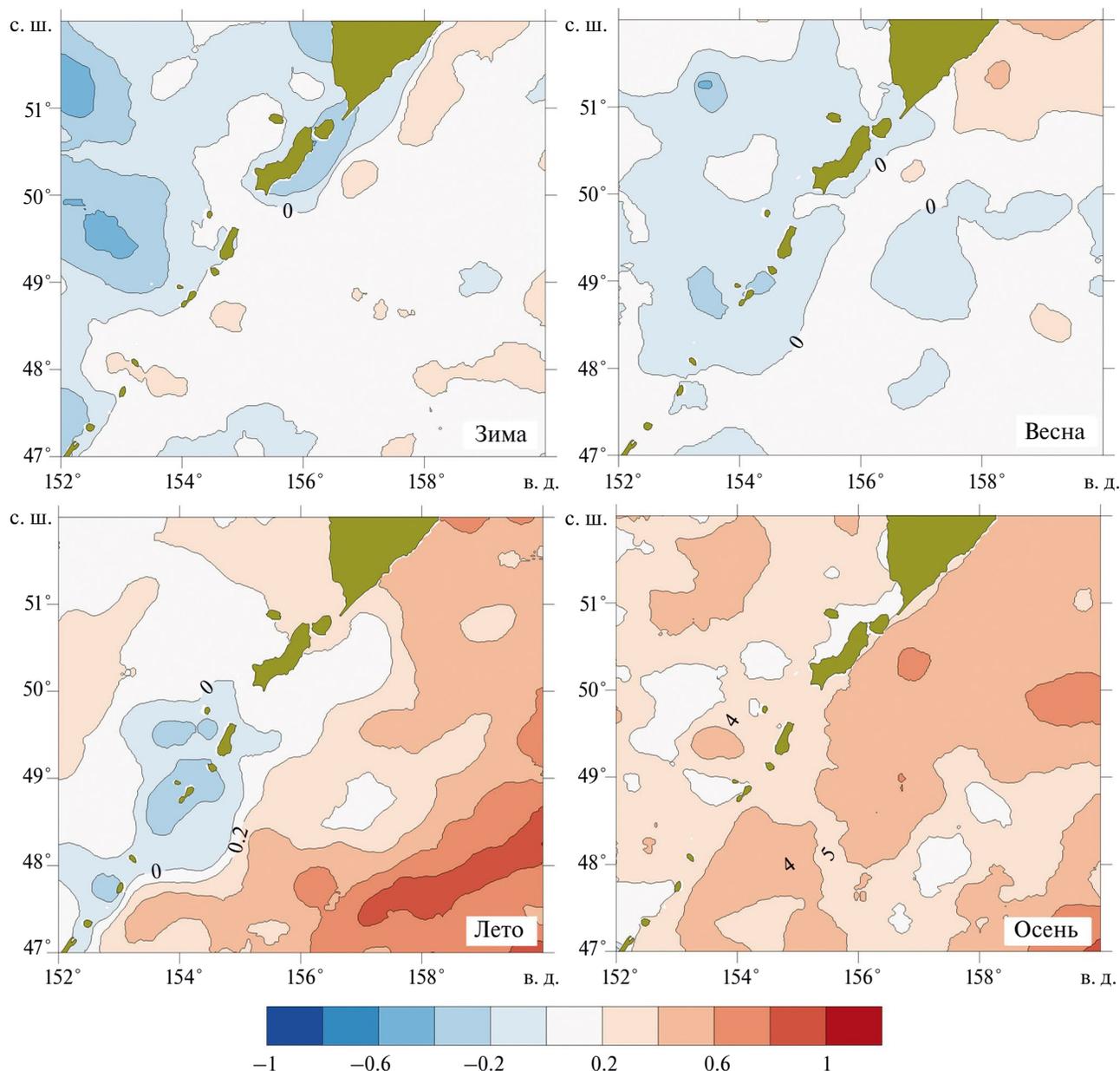


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда в вариациях ТПО (в °С/10 лет) в различные сезоны года в районе северных Курильских островов.

Интересно, что в течение ряда лет (с 2003 по 2009 г.) этого не наблюдалось ни разу, а в некоторые годы неоднократно (например, в 2013 г. в течение шести месяцев). Отметим, что при расчете аномалий из данных не вычитался линейный тренд, что могло привести к росту числа положительных аномалий в последние годы. Однако, как следует из рис. 6, этого не произошло, очевидно, эффекты, связанные с наличием тенденции к росту ТПО, не сказались существенно на рассматриваемом явлении.

Для более тщательного анализа были отображены ситуации, когда площадь значимых аномалий

была выше 20% (табл. 2). Их было десять, в девяти из них наблюдались отрицательные и только в одном случае положительные аномалии. В четырех из них зоны экстремальных температур занимали более 40%, а в восьми случаях – более четверти всей площади. Это говорит о том, что отклонения термического режима от “нормы” у Северных Курил могут быть масштабными. При этом явно преобладают случаи чрезвычайно холодных условий. Такая диспропорция весьма необычна, ее физические причины неясны и требуют дальнейшего изучения.

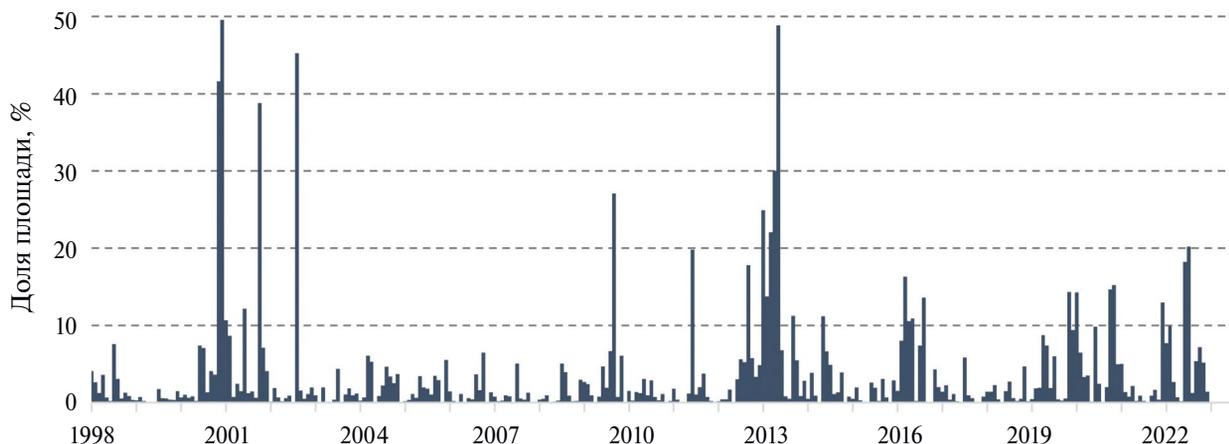


Рис. 6. Доли площади экстремальных аномалий ТПО, превышающих величину 2σ , в районе Северных Курильских островов.

Таблица 2. Информация о наиболее значительных аномалиях ТПО в районе северных Курильских островов

Период	Доля площади, %	Знак аномалии
Ноябрь 2000 г.	41.64	Отрицательный
Декабрь 2000 г.	49.61	Отрицательный
Октябрь 2001 г.	38.81	Отрицательный
Август 2002 г.	45.25	Отрицательный
Сентябрь 2009 г.	27.09	Отрицательный
Январь 2013 г.	24.91	Отрицательный
Март 2013 г.	22.07	Отрицательный
Апрель 2013 г.	30.03	Отрицательный
Май 2013 г.	48.86	Отрицательный
Июль 2022 г.	20.22	Положительный

На рис. 7 представлены пространственные распределения с наиболее значительными аномалиями ТПО. В декабре 2000 г. на большей части района температура была на 2°C , а на отдельных участках на 2.5°C ниже средне многолетней нормы. Обычно такие показатели рассматриваются как рядовые события, однако в декабре изменчивость ТПО сравнительно невысока при величине среднеквадратического отклонения 0.6°C (см. табл. 2).

В августе 2002 г. отрицательные аномалии охватывали практически всю акваторию, причем на удаленных от берега участках как в Охотском море, так и в Тихом океане они имели значительную величину – от -4 до -6°C . При этом вблизи побережья Камчатки и Курильских островов они были гораздо меньше и не превышали $1-2^{\circ}\text{C}$.

Весной “аномального” 2013 г. площадь отклонений, превышающих по величине 2σ , составила более 20% акватории в течение трех последующих месяцев – с марта по май (см. табл. 2). В мае почти по-

ловиная изучаемой области (49%) находилась в зоне существенных отрицательных аномалий (до 3°C).

В августе 2022 г. зафиксирован единственный случай, когда на достаточно большой площади отмечались значительные положительные аномалии ТПО. На отдельных участках температура воды была на 4°C выше нормы. В прибрежных районах юго-восточной Камчатки и Курильских островов термические показатели в целом соответствовали средне многолетней норме.

Разложение поля ТПО по ЕОФ. Важные особенности сезонной и межгодовой изменчивости можно определить при помощи разложения гидрометеорологических полей по естественным ортогональным функциям (Новиненко, Шевченко, 2007). Результаты расчета в виде пространственных распределений первых трех основных мод (на их долю приходится 96.65; 0.51 и 0.25% дисперсии ТПО) и соответствующих им временных функций представлены на рис. 8.

При разложении методом ЕОФ гидрометеорологических полей с выраженным сезонным ходом (вариации температуры морской воды или атмосферного воздуха являются одними из наиболее ярких примеров такого рода) первая мода дает подавляющий вклад в общую дисперсию параметра, что, однако, не обесценивает роль более высоких составляющих.

Пространственная структура первой моды практически идентична усредненному распределению ТПО в летний период (низкие значения у побережья Курильских островов и высокие в открытом океане и удаленной от побережья части Охотского моря), а ее временная функция имеет очень высокую корреляцию ($r=0.996$) со средними месячными значениями температуры. По этой причине глав-

ную составляющую ЕОФ рассматривать подробно нет смысла. Отметим только, что временная функция хорошо аппроксимируется комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 0.9 и 0.2 °С, достигает максимальных значений в августе–сентябре и минимума в феврале–марте. Первая мода описывает колебания параметра, которые во всей области происходят синфазно, хотя и с различной интенсивностью на участках, характеризующейся пространственной функцией.

Вторая мода отражает вариации ТПО, которые не укладываются в представление об одинаковом

ходе параметра. Поэтому в пространственном распределении выделяются зоны с различными знаками, разделенные узловой линией, вблизи которой вклад данной моды незначителен. Эта линия проходит в районе 49-й параллели, к северу от которой значения моды положительные (до 1.2 у юго-восточного берега Камчатки), а к югу – отрицательные (до –1.1 на юго-восточном участке).

Усредненная кривая временной функции имеет положительные значения с июня по август с выраженным максимумом в июле. В остальные месяцы – величины отрицательные, с минимумами

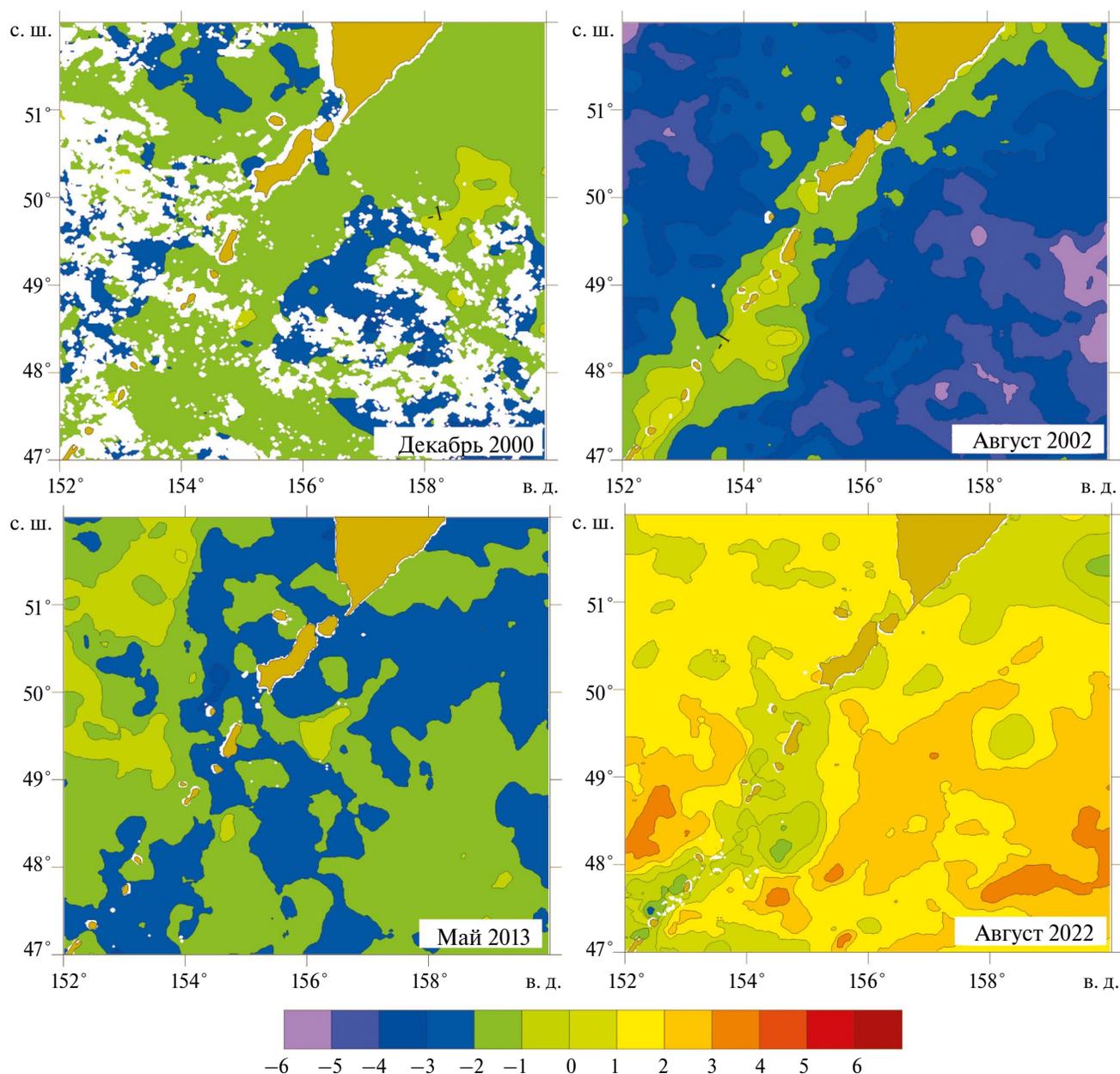


Рис. 7. Пространственное распределение наиболее значительных аномалий ТПО (в °С) в районе северных Курильских островов.

в октябре–ноябре. Это означает, что летом вторая мода дает поправку к основной составляющей, положительную – в северной части акватории и отри-

цательную – в южных районах. В холодный период года ситуация обратная – на севере ее вклад отрицательный, в южных районах положительный.

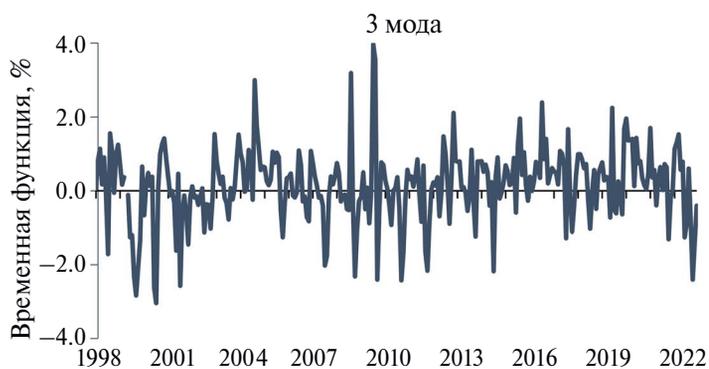
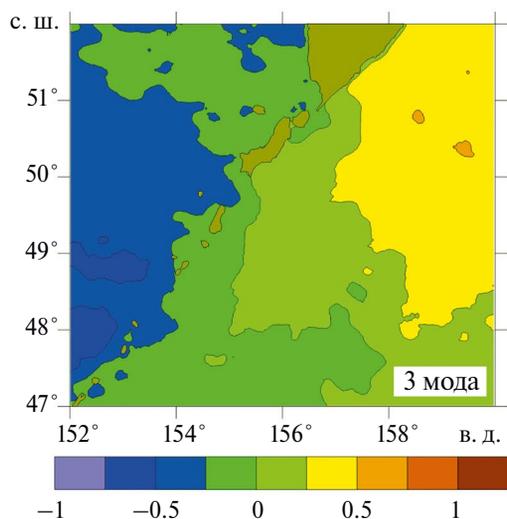
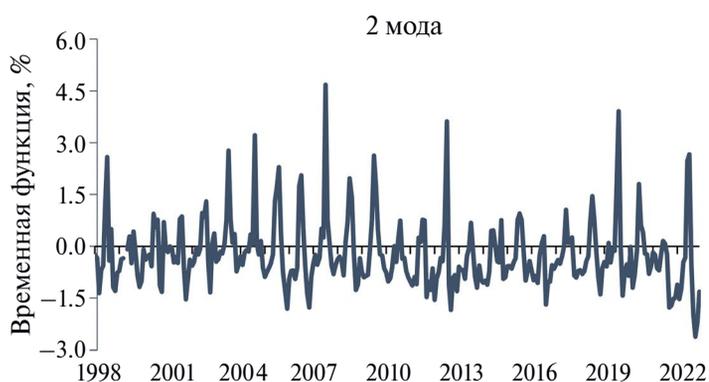
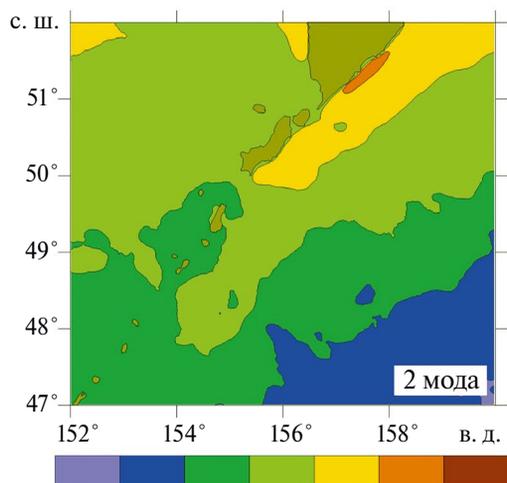
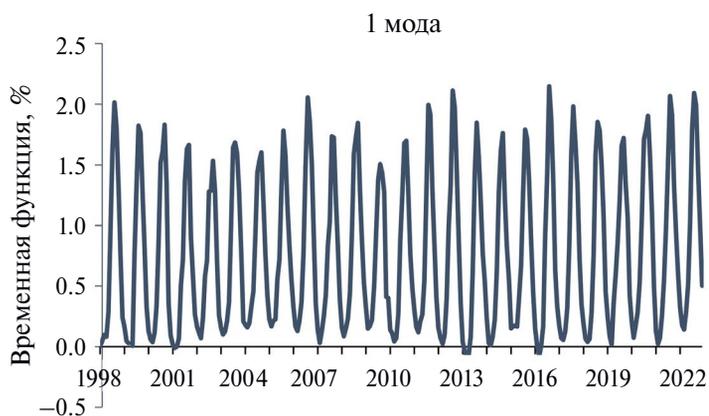
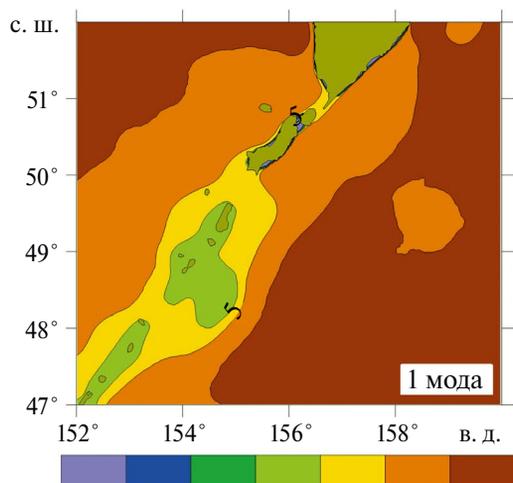


Рис. 8. Пространственное распределение (безразмерное) и графики временных функций (в °С) первых трех мод разложения поля ТПО по ЕОФ в районе северных Курильских островов.

Во временной функции этой моды заметны значительные межгодовые вариации, значимо выделяется 11-летний цикл, в меньшей степени – 6-летний, при этом годовой ее ход в целом сохраняется. Наибольшие положительные значения и, соответственно, максимальный вклад моды в общее поле ТПО, отмечены в июле 2007, 2012 и 2019 гг. В некоторые годы (например, в 1999 и 2016 гг.) летний максимум ослаблен, значения временной функции на порядок меньше, чем в случаях выраженного максимума. Отрицательные величины более стабильны, экстремальные минимумы выявлены осенью 2022 г. (ниже -2°C).

Если вторая мода дает к основной компоненте зональную поправку, то третья вносит корректировку меридионального характера. Ее пространственная функция принимала отрицательные значения практически на всем охотоморском участке изучаемой области. В СЗТО узловая линия проходила приблизительно вдоль 155-го меридиана с положительными величинами в восточной части акватории и отрицательными – в западной. Разброс значений составил от -0.6 до $+0.5^{\circ}\text{C}$.

В отличие от первых двух мод, временная функция третьей моды не носила устойчивого повторяющегося сезонного характера. Ее усредненные за 1998–2022 гг. значения для различных месяцев года положительны в январе–июне, в августе и декабре. В случае положительных значений временной функции положительная поправка имела место в восточной части изучаемой области, а отрицательная – в западной. При отрицательных значениях поправка приобретала обратный характер. Наибольшее общее изменение ТПО, обусловленное вкладом третьей моды, отмечалось в июле 2009 г., оно составило около $+2^{\circ}\text{C}$ в восточной и -2.5°C – в западной части бассейна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет усредненных распределений ТПО по сезонам установил главную особенность термического режима в районе северных Курильских островов, выраженную в наличии постоянно существующей области с низкими значениями температуры воды. Она охватывает прибрежную акваторию архипелага от о. Симушир до Четвертого Курильского пролива и не включает воды вблизи о-вов Шумшу и Парамушир. Термические показатели возрастают по мере удаления от нее как в открытый океан, так и в Охотское море. Наиболее широкой зона холодной воды становится вблизи о. Шиашкотан, где в районе северного отрога хребта Витязь образуется второе пятно. Эта особенность подчеркивает ключевую роль донного рельефа в формировании холодной зоны.

Сезонные колебания ТПО характеризуются отчетливым годовым ходом с максимальными значениями в августе–сентябре и минимальными в феврале–марте. Они хорошо описываются комбинацией годовой и полугодовой гармоник с амплитудами 4.9 и 1.1°C , колебания которых уменьшаются в зоне холодных вод и увеличиваются по мере удаления от островов в мористые районы. Межгодовая изменчивость термического режима выявлена главным образом в модуляции годового хода с периодом около шести лет.

Во временных функциях двух главных мод разложения поля ТПО по ЕОФ в огибающей по летним максимумам проявляются циклы с периодами около 11 и шести лет. В пространственной структуре первой моды выделяется область низких значений вблизи Курильских островов. Вторая мода отражает различия термических условий в северной и южной частях изучаемого района, третья – в акватории Охотского моря и СЗТО.

Расчет коэффициентов линейного тренда определил направление к повышению температуры в целом по району со скоростью около 1°C за 25 лет. Тенденция к потеплению наиболее заметна в прилегающей части СЗТО в летний и в несколько меньшей степени в осенний период. В области холодного пятна преимущественно зимой и весной отмечается обратный тренд.

Анализ полей ТПО за 25 лет наблюдений показал, что временами в районе Северных Курил могут формироваться значительные, превышающие удвоенную величину среднеквадратического отклонения температурные аномалии. В десяти случаях из 300 доля площади, на которой наблюдались такие аномалии, составила более 20%, а в четырех из них – более 40%. Это говорит о том, что отклонения термического режима могут быть масштабными, проявляться на значительной части акватории и представлять серьезную опасность для обитающих здесь гидробионтов. При этом явно преобладали случаи аномально холодных условий. Такая диспропорция весьма необычна, ее физические причины неясны и требуют дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих // Труды ЦИП. 1959. Вып. 74. С. 3–24.
- Бышев В.И., Фигуркин А.Л., Анисимов И.М. Современные климатические изменения термохалинной структуры вод СЗТО // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 215–227.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф. С. Терзиева и др. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 342 с.

Глебова С.Ю., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Долгопериодные тенденции в ходе атмосферных процессов и термического режима дальневосточных морей за последний 30-летний период // Известия ТИНРО. 2009. Т. 159. С. 285–298.

Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Глебова С.Ю., Гостренко Л.М., Дубинина А.Ю., Дулепова Е.П., Золотов А.О., Лобода С.В., Лысенко А.В., Матвеев В.И., Муктепавел Л.С., Овсянников Е.Е., Фигуркин А.Л., Шатилина Т.А. Современные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Известия ТИНРО. 2019. Т. 197. С. 35–61. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61.

Кантаков Г.А. Океанографический режим тихоокеанского шельфа и материкового склона Северных Курил и его влияние на распределение промысловых объектов // Промыслов-биологические исследования рыб в тихоокеанских водах Курильских островов и прилежащих районах Охотского и Берингова морей в 1992–1998 гг. М.: ВНИРО, 2000. С. 54–64.

Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 55–61. DOI 10.31857/S0205-96142019155-61.

Ложкин Д.М., Шевченко Г.В. Циклические вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным в 1998–2018 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 44–51. DOI: 10.31857/S0205961420010066.

Новиненко Е.Г., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 50–60.

Рогачев К.А., Шлык Н.В. Многолетние изменения вихря ветра и уровень моря в Камчатском течении // Океанология. 2005. Т. 45. № 3. С. 339–348.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Рудых Н.И., Воронцов А.А. Климатические изменения термических условий окраинных морей западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. 2020. № 3. С. 44–57.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Рудых Н.И. Климатические изменения термических условий в тихоокеанской субарктике

в условиях современного глобального потепления // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 2. С. 162–178. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-162-178>.

Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия // Известия ТИНРО. 2017. Т. 191. С. 176–195.

Самко Е.В., Новиков Ю.В. Среднемноголетняя геострофическая циркуляция вод прикурильского района Тихого океана // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 5–10.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Фигуркин А.Л., Зуенко Ю.И., Новиков Ю.В., Сорокин Ю.Д., Гаманюк М.В. Гидрологические условия северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей в начале XXI века и ожидаемые тенденции // Вопросы промысловой океанологии. 2004. № 1. С. 40–58.

Хен Г.В., Басюк Е.О., Сорокин Ю.Д., Устинова Е.И., Фигуркин А.Л. Термические условия на поверхности Берингова и Охотского морей в начале 21-го века на фоне полувекковой изменчивости // Известия ТИНРО. 2008. Т. 153. С. 254–263.

Хен Г.В., Устинова Е.И., Сорокин Ю.Д. Многолетние изменения термических условий на поверхности дальневосточных морей и СЗТО и их связь с крупномасштабными климатическими процессами // Изв. ТИНРО. 2022. Т. 202. № 1. С. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-187-207.

Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В., Ложкин Д.М. Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 1. С. 30–37. DOI: 10.31857/S0205961422010079.

Joyce T., Dunworth-Baker J. Long-term hydrographic variability in the Northwest Pacific Ocean // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30. Is. 2. P. 1043. <https://doi.org/10.1029/2002GL015225>.

Kono T., Kawasaki Y. Modification of the western subarctic water by exchange with the Okhotsk Sea // Deep Sea Res. Part I. 1997. Vol. 44. Is. 4. P. 689–711.

Ustinova E. Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific // PICES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract. Victoria, BC, Canada. 2021. P. 26.

Seasonal and Interannual Variations in Ocean Surface Temperature in the Area of the Northern Kuril Islands According to Satellite Data

G. V. Shevchenko^{1,2}, Zh. R. Tshay¹, D. M. Lozhkin¹

¹Sakhalin Branch of “VNIRO” (“SakhNIRO”), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

The average monthly values of ocean surface temperature in the area of the northern Kuril Islands for 1998–2022 are analyzed. On the basis of a 25-year series of observations, the norms are constructed for each month – the average long-term distributions. It is shown that in the coastal area from the Simushir Island to the Fourth Kuril Strait, a cold spot area with very low temperatures (about 6 °C) and small annual cycle amplitudes (about 3 °C) is formed in summer. Seasonal fluctuations are characterized by an annual cycle with maximum values in August–September and minimum values in February–March. In general, they are well described in the region by a combination of annual and semi-annual harmonics with amplitudes of 4.9 and 1.1 °C, respectively. The interannual variability is reflected in variations of summer maxima with a period of about six years. In the summer and autumn period, outside the cold spot area, there is a steady trend towards an increase in temperature, the most significant in the northwestern Pacific Ocean (about 1 °C in 25 years). In the winter-spring season in the Sea of Okhotsk, the reverse situation is observed with a tendency to decrease thermal parameters. When

calculating deviations of average monthly temperatures from normal values, it was revealed that large-scale zones with significant temperature anomalies, mainly negative ones, can be formed in the area of the North Kuril Islands, which can pose a serious danger to aquatic organisms.

Keywords: thermal regime, temperature anomalies, linear trend, harmonic analysis, method of natural orthogonal functions, Kamchatka Peninsula, Sea of Okhotsk, Northwestern Pacific Ocean

REFERENCES

- Bagrov N.A.* Analiticheskoe predstavlenie posledovatel'nosti meteorologicheskikh polei posredstvom estestvennykh ortogonal'nykh sostavlyayushchikh [Analytical representation of a sequence of meteorological fields by means of natural orthogonal components] // Tr. Tsentral'nogo instituta prognozov. 1959. Issue 74. P. 3–24. (In Russian).
- Byshev V.I., Figurkin A.L., Anisimov I.M.* Sovremennye klimaticheskie izmeneniya termohalinnoj struktury vod SZTO [Recent climate changes of thermohaline structure in the North-West Pacific] // Izv. TINRO. 2016. V. 185. P. 215–227. (In Russian).
- Gidrometeorologiya i gidrohimiya morej. Tom IX. Ohotskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Volume IX. The Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological conditions] / Pod red. F. S. Terzieva i dr. SPb. : Gidrometeoizdat, 1998. 342 p. (In Russian).
- Glebova S.Yu., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D.* Dolgoperiodnye tendencii v hode atmosferynykh processov i termicheskogo rezhima dal'nevostochnykh morej za poslednij 30-letnij period [Long-period trends in the course of atmospheric processes and thermal regime of the Far Eastern seas over the last 30 years] // Izvestiya TINRO. 2009. V. 159. P. 285–298. (In Russian).
- Zuenko Yu.I., Aseva N.L., Glebova S.Yu., Gostrenko L.M., Dubinina A.Yu., Dulepova E.P., Zolotov A.O., Loboda S.V., Lysenko A.V., Matveev V.I., Muktepavel L.S., Ovsyannikov E.E., Figurkin A.L., SHatilina T.A.* Sovremennye izmeneniya v ekosisteme Ohotskogo morya (2008–2018 gg.) [Modern changes in the ecosystem of the Sea of Okhotsk (2008–2018)] // Izvestiya TINRO. 2019. V. 197. P. 35–61. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-35-61.
- Kantakov G.A.* Okeanograficheskij rezhim tihookeanskogo shel'fa i materikovogo sklona Severnykh Kuril i ego vliyanie na raspredelenie promyslovykh ob'ektov [The oceanographic regime of the Pacific shelf and the continental slope of the North Kuril Islands and its impact on the distribution of fishing facilities] // Promyslov-biologicheskije issledovaniya ryb v tihookeanskih vodah Kuril'skikh ostrovov i prilozhashchih rajonah Ohotskogo i Beringova morej v 1992–1998 gg. M.: VNIRO, 2000. P. 54–64. (In Russian).
- Lozhkin D.M., Shevchenko G.V.* Trendy temperatury poverhnosti Ohotskogo morya i prilagayushchih akvatorij po sputnikovym dannym 1998–2017 gg. [Trends in sea surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent water areas according to satellite data 1998–2017] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2019. Iss. 1. P. 55–61. DOI: 10.31857/S0205-96142019155-61. (In Russian).
- Lozhkin D.M., Shevchenko G.V.* Ciklicheskie variacii temperatury poverhnosti Ohotskogo morya i prilagayushchih akvatorij po sputnikovym dannym v 1998–2018 gg. [Cyclic variations of the sea surface temperature of the Sea of Okhotsk and adjacent areas according to satellite data in 1998–2018] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2020. Iss. 1. P. 44–51. DOI: 10.31857/S0205961420010066. (In Russian).
- Novinenko E.G., Shevchenko G.V.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' temperatury poverhnosti Ohotskogo morya po sputnikovym dannym [Spatial and temporal variability of the sea surface temperature of the Sea of Okhotsk according to satellite data] // Issled. Zemli iz kosmosa. 2007. Iss. 5. P. 50–60. (In Russian).
- Rogachev K.A., Shlyk N.V.* Mnogoletnie izmeneniya vihrya vetra i uroven' morya v Kamchatskom techenii [Long-term changes in the wind vortex and sea level in the Kamchatka current] // Okeanologiya. 2005. V. 45. Iss. 3. P. 339–348. (In Russian).
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Rudyh N.I., Voroncov A.A.* Klimaticheskie izmeneniya termicheskikh uslovij okrainnykh morej zapadnoj chasti Tihogo okeana [Climatic changes in the thermal conditions of the marginal seas of the Western Pacific Ocean] // Meteorologiya i gidrologiya. 2020. Iss. 3. P. 44–57. (In Russian).
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Rudyh N.I.* Klimaticheskie izmeneniya termicheskikh uslovij v tihookeanskoj subarktike v usloviyah sovremenogo global'nogo potepeniya [Climatic changes in thermal conditions in the Pacific Subarctic in the context of modern global warming] // Morskoy gidrofizicheskij zhurnal. 2021. V. 37. Iss. 2. S. 162–178. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-2-162-178>. (In Russian, English translation).
- Rostov I.D., Dmitrieva E.V., Voroncov A.A.* Tendencii klimaticheskich izmenenij termicheskikh uslovij pribrezhnykh rajonov Ohotskogo morya za poslednie desyatiletija [Trends in climatic changes in thermal conditions of the coastal areas of the Sea of Okhotsk in recent decades] // Izvestiya TINRO. 2017. V. 191. P. 176–195. (In Russian).
- Samko E.V., Novikov Y.V.* Srednemnogoletnyaya geostroficheskaya cirkulyaciya vod prikuril'skogo rajona Tihogo okeana [Average long-term geostrophic water circulation in the Kuril Islands region of the Pacific Ocean] // Okeanologiya. 2004. V. 44. Iss. 1. S. 5–10. (In Russian, English translation).
- Khen G.V., Ustinova E.I., Figurkin A.L., Zuenko Yu.I., Novikov Yu.V., Sorokin Yu.D., Gamanyuk M.V.* Gidrologicheskie usloviya severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana i dal'nevostochnykh morej v nachale XXI veka i ozhidaemye tendencii [Hydrological conditions of the Northwestern Pacific Ocean and the Far Eastern seas at the beginning of the XXI century and expected trends] // Voprosy promyslovoj okeanologii. 2004. Iss. 1. P. 40–58.
- Khen G.V., Basyuk E.O., Sorokin Yu.D., Ustinova E.I., Figurkin A.L.* Termicheskie usloviya na poverkhnosti Beringova i Ohotskogo morej v nachale 21-go veka na fone poluvekovoi izmenchivosti [Surface thermal conditions in the Bering and Okhotsk Seas in the early 21 Century against previous semi-centennial changes] // Izv. TINRO. 2008. V. 153. P. 254–263 (In Russian).

- Khen G.V., Ustinova E.I., Sorokin Yu.D.* Многолетние изменения термических условий на поверхности дальневосточных морей и SZTO и их связь с крупномасштабными климатическими процессами [Long-term changes in thermal conditions on the surface of the Far-Eastern Seas and North-West Pacific and their relationship with large-scale climate processes] // *Izv. TINRO*. 2020. V. 202. Issue 1. P. 187–207. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-187-207. (In Russian).
- Tskhai Zh.R., Shevchenko G.V., Lozhkin D.M.* Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным [Analysis of Thermal Conditions in the Northwest Pacific Ocean from Satellite Data] // *Исследование Земли из космоса*. 2022. Iss. 1. P. 30–37. DOI: 10.31857/S0205961422010079. EDN HRSJAX. (In Russian).
- Joyce T., Dunworth-Baker J.* Long-term hydrographic variability in the Northwest Pacific Ocean // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30. Is. 2. P. 1043. <https://doi.org/10.1029/2002GL015225>.
- Kono T., Kawasaki Y.* Modification of the western subarctic water by exchange with the Okhotsk Sea // *Deep Sea Res. Part I*. 1997. Vol. 44. Is. 4. P. 689–711.
- Ustinova E.* Extreme events in the thermal state of the Far-Eastern Seas and adjacent waters of the Northwestern Pacific // *PICES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract*. Victoria, BC, Canada. 2021. P. 26.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала “Исследование Земли из космоса” РАН находится по адресу 119991 Москва, Ленинский пр-т, 14, Российская академия наук, e-mail: izk.journal1980@gmail.com; сайт: <http://www.jizk.ru/>. Редколлегия журнала просит авторов при направлении статей в печать руководствоваться изложенными ниже правилами.

Представление рукописей. В журнале публикуются только научные оригинальные исследования, обзоры, хроника, рецензии и краткие сообщения по всем актуальным вопросам дистанционного зондирования Земли.

Все работы, подготовленные отечественными или зарубежными авторами для опубликования в журнале “Исследование Земли из космоса” РАН, следует направлять на электронный адрес редакции: izk.journal1980@gmail.com.

Каждая статья должна быть подписана всеми авторами на ее последней странице. Необходимо также сообщить фамилию, имя и отчество автора, ответственного за связь с редакцией, номер его телефона (служебного/мобильного/домашнего), адрес его электронной почты (на него впоследствии будут высланы корректура статьи, а затем и оттиски в PDF-файлах).

Рукопись статьи следует сопроводить направлением от учреждения и экспертным заключением (актом экспертизы). Направляя статью в редакцию, авторы тем самым передают учредителю и издателю (федеральному государственному бюджетному учреждению “Российская академия наук”) право на ее публикацию, сохраняя при этом за собой все остальные права собственности, в связи с чем им необходимо приложить к своей работе Лицензионный договор. Бланк Лицензионного договора можно скачать на сайте (<http://www.ras.ru/publishingactivity/niso.aspx>).

Электронную версию статьи в редакцию следует представлять в двух форматах — MS Word и PDF — для более быстрого проведения ее рецензирования.

Общие требования. Полный объем статьи не должен превышать 22 стр. (он может быть увеличен лишь в исключительных случаях по специальному решению редколлегии), обзора — 30 стр., кратких сообщений, рецензий, информации и писем в редакцию — 7–10 стр.

Текст статьи должен быть тщательно отредактирован и изложен с предельной краткостью,

совместимой с ясностью изложения, — для четкого представления о задачах исследования, методике и полученных результатах. Аннотация (на русском и английском языках) должна содержать основные результаты исследований, приводимых на страницах рукописи, а не перечень вопросов, рассматриваемых в ней.

В статье следует избегать терминов и сокращений, употребляемых лишь узкой группой специалистов, или приводить их расшифровку при первом упоминании в тексте. Вместе с тем часто употребляемые термины, состоящие из двух и более слов, следует сокращать до аббревиатур.

Не допускается перегрузка статей формулами, дублированием результатов в таблицах и рисунках. Буквенные обозначения и набранные формулы должны быть четкими и ясными. Следует избегать смешанного употребления русских и латинских индексов в одной статье. Подстрочные примечания допускаются только для очень кратких фактических справок и в минимальном количестве.

Рекомендуется разбивать материал статьи на разделы, начиная его с введения, излагающего постановку задачи, и заканчивая заключением с перечнем основных результатов работы (нумерации разделов следует избегать). В конце текста статьи приводится список используемой литературы.

Оформление рукописей. Оригинал статьи должен быть набран стандартным (12 pt) шрифтом гарнитуры Times New Roman. С левой стороны страницы, сверху и снизу следует оставлять поля 2.5 см, справа — 1 см. Страницы рукописи должны быть пронумерованы по отдельности (номер ставится сверху страницы от центра, первая страница учитывается, но номер на ней не ставится).

Аннотации с ключевыми словами под ними приводятся в начале (русский яз.) и в конце (английский яз.) статьи, таблицы, рисунки и подрисуночные подписи к ним должны быть введены в основной текст на местах, которые авторы считают необходимыми при ссылке на них. Дополнительно рисунки следует вложить отдельными файлами.

На первой странице рукописи в следующем порядке размещаются: заголовок статьи; © год; инициалы и фамилии всех авторов (через запятую); полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнялась работа, с указанием города, в котором оно находится; адрес электронной почты одного из авторов (около адреса, как и возле фа-

мии автора, ставится звездочка) для переписки с ним; краткая аннотация на русском языке с ключевыми словами к ней (не рекомендуется вводить в текст аннотации нестандартные аббревиатуры и ссылки на литературу).

Название статьи, инициалы и фамилии всех авторов, названия учреждений, города и текст аннотации на английском языке с ключевыми словами к ней приводятся на последней странице – после текста статьи и Списка литературы. Ключевые слова должны содержать не более 10–15 слов. (*Ключевые слова*: радиометр, радиояркость температура, излучательная способность и т.д.), (*Keywords*: radiometer, radiobrightness temperature, radiation, etc.).

Основной текст статьи начинается со второй страницы – после аннотации – с ВВЕДЕНИЯ, излагающего постановку задачи, затем рассматриваются исследуемый регион, данные, методы и средства или описание эксперимента, результаты и их обсуждение; заканчивается статья ЗАКЛЮЧЕНИЕМ с перечнем основных результатов работы.

Литература. Цитируемая в рукописи литература приводится в алфавитном порядке общим списком на отдельной странице в конце статьи под заголовком “СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ” и перед аннотацией на английском языке. Сначала приводятся ссылки на работы, опубликованные на русском языке, с указанием фамилий и инициалов всех авторов. Далее по принципу латинского алфавита следуют ссылки на работы, опубликованные на иностранных языках. Порядковый номер при каждой ссылке не ставится. Работы одного и того же автора приводятся в хронологическом порядке. Работы одного и того же первого автора при наличии соавторов располагаются в алфавитном порядке с учетом фамилии второго, третьего и т.д. авторов.

Цитируемая литература приводится в соответствии со следующими правилами:

а) для журнальных статей указываются фамилии и инициалы всех авторов (курсивом), название статьи, через две косые – название журнала, год издания, номер тома, выпуска, первой и последней страниц (название журнала пишется сокращенно, предлоги опускаются, при сокращении названий англоязычных журналов рекомендуется руководствоваться общепринятым списком сокращений);

б) для книг – фамилии и инициалы всех авторов (курсивом), полное название книги (если это сборник, то указать через одну косую редакторов: / Под ред. (или Eds.) – и далее инициалы и фамилии всех редакторов), место издания (город), название издательства, год издания и общее количество страниц.

В ссылках на статьи, опубликованные в трудах конференций, необходимо указывать название конференции, затем, через косую, редакторов сборника

статей, город, где он издавался, издательство, год издания, первую и последнюю страницы публикации.

В самом тексте статьи ссылки на цитируемую литературу следует давать в круглых скобках с указанием только фамилии автора (набирать прямо) и года выхода его работы в свет, – например (Кульбак, 1967) или (Peake, Oliver, 1971). Если цитируется несколько работ одного и того же автора, датированных одним и тем же годом, к указываемому году следует добавлять буквы а, б, в, ... (на русском языке) или a, b, c, ... (согласно латинскому алфавиту), – например (Кондратьев, 2000а, 2000б). Если автора два, то указываются оба, через запятую, – например (Козодеров, Егоров, 2003). Если авторов более двух, то указывается лишь первый из них с добавлением слов “и др.” или “et al.”, – например (Раев и др., 2001), (Lee et al., 2003).

Пример написания ссылок в “СПИСКЕ ЛИТЕРАТУРЫ”:

– статья в журнале:

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В. Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.

– статья в зарубежном журнале:

Yang E.S., Cunnold D.M. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D17309. DOI: 10.1029/2005JD006371.

– монография:

Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

– статья в сборнике:

Лаврова О.Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса / Под ред. Е.А. Лупяна, О.Ю. Лавровой. М.: GRANP Polygraph, 2005. Т. 2. С. 118–123.

– конференция:

Lavrova O. Yu., Sabinin K.D. Surface manifestations of the deep-ocean internal solitons near Kam-chatka // Proc. 4th Pacific Ocean Rem. Sens. Conf. (PORSEC'98). 28–31 July 1998. Qingdao, China, 1998. P. 463–465.

Далее, после аннотации на английском языке, следует поместить под заголовком REFERENCES список статей на русском языке из СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ в латинской транслитерации и перевод названия статьи на английский (в квадратных скобках). После выходных данных статьи указать в круглых скобках (In Russian).

Статьи в зарубежных изданиях также приводятся в REFERENCES (без изменений).

Статьи располагаются по порядку в соответствии с английским алфавитом.

Ниже приводим транслитерацию, которую условно можно назвать английской, так как в ее

Рус. А Б В Г Д Е Ё Ж З И Й К Л М Н О П Р С Т У Ф Х Ц Ч Ш Щ Ъ Ы Ь Э Ю Я
Лат. A B V G D E E ZH Z I Y K L M N O P R S T U F H, KH TS CH SH SCH ' Y ' E YU YA

Пример написания ссылок в “REFERENCES”:

– статья в российском журнале:

Kozoderov V.V., Kondranin V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Innovatsionnaya tekhnologiya obrabotki mnogospetral'nikh kosmicheskikh izobrazheniy zemnoy poverhnosti [Innovative technology for processing multispectral space images of the Earth's surface] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2008. № 1. P. 56–72. (In Russian).

– статья в зарубежном издании:

Yang E.S., Cunnold D.M. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D17309. DOI: 10.1029/2005JD006371.

Таблицы. Таблицы, сколько бы их ни было в тексте, нумеруются и размещаются по порядку их упоминания. Все графы в таблицах и сами таблицы должны иметь заголовки, сокращение слов в них не допускается. В заголовках колонок таблиц следует избегать сложных текстовых разъяснений. Если все же они необходимы, нужно ввести символы (обозначения) и объяснить их в тексте статьи. Не представляйте таблицы в виде изображений и фотографий.

Формулы и другие математические выражения также должны приводиться в тексте с учетом требований экономии места. Известные и заимствованные формулы следует приводить в конечном виде, а в случае необходимости – со ссылкой на литературу. Нумеруются только те формулы, на которые в дальнейшем есть ссылки в тексте. Краткие и несложные формулы пишутся в строку в самом тексте. Для обозначения операции деления используется наклонная черта. Нумерация формул дается справа в круглых скобках. Дробная часть десятичного числа отделяется от целой части точкой (пример: 3.57).

Размерность величин следует указывать с применением косой черты (например, см/с, г/см³, но размерность концентрации следует писать см⁻³). В экспоненциальном представлении числа записываются в виде 1.3×10^{-2} , а не 1.3E-2.

Русские и греческие буквы в формулах, математические символы типа sin, Re, exp и т.д., а также химические элементы и цифра “ноль” (0) всегда набираются прямо, все латинские буквы – курсивом, векторы – без стрелки над буквой, прямо, полужирным шрифтом.

Иллюстрации. Статья не должна быть перегружена рисунками (желательно до семи на статью). Рисунки, изображения и фотографии, помимо вве-

дение их в текст для информативности и целостности публикации, обязательно следует представлять еще файлами отдельно от текста, и их качество должно позволять при печати их репродуцирование в журнал в представленном авторами виде. При наличии нескольких связанных друг с другом рисунков они должны быть рационально и экономно скомпонованы. Векторные иллюстрации должны быть предоставлены в стандартном формате файлов графического редактора, в котором они были подготовлены, также принимается формат EPS. Остальные иллюстрации принимаются в стандартных графических форматах, предпочтительно – TIFF, с разрешением не ниже 300 и до 600 dpi. На самом рисунке должно быть минимальное количество словесных обозначений на русском языке, пояснения следует вносить в подрисуночные подписи или в текст статьи. Если фотография либо графический материал заимствованы у других авторов, обязательно следует указать источник получения материала и при необходимости – разрешение на его воспроизводство.

Электронная версия статьи. Как уже отмечалось выше, автор(ы) в обязательном порядке должен представить в редакцию электронную версию своей статьи в двух форматах – MS Word и PDF, – включающих текст с аннотациями, рисунками и таблицами, а также сопроводить их отсканированными сопроводительным письмом (Направление от организации), Лицензионным договором и Актом экспертизы (если это необходимо) – желательно в формате PDF-файлов.

При подготовке иллюстративных файлов помимо основных необходимо придерживаться также приведенных ниже правил.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИЛЛЮСТРАЦИЯМ

1. Общие требования:

1.1. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8.5 см (на одну колонку), либо 17–17.5 см (на две колонки);

1.2. Надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому важно располагать их так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

1.3. Для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

1.4. Просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки.

2. Штриховые иллюстрации:

2.1. Графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах;

2.2. Они должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;

2.3. Толщина линий не должна быть меньше 0.5 pt;

2.4. Векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как “Noise”, “Black&white noise”, “Top noise”;

2.5. Для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.

3. Полутоновые иллюстрации:

3.1. Должны иметь разрешение от 300 dpi и выше.

4. Комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:

4.1. Должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

Публикация цветных иллюстраций

1. Во многих случаях при публикации иллюстраций в черно-белом варианте теряется их информативность, поэтому при необходимости для большей наглядности производится публикация цветных иллюстраций, но только в online-версии журнала. Для журналов, работающих с электронной корректурой, как журнал “Исследование Земли из космоса”, такая публикация бесплатная при выполнении следующих условий:

1.1. Выполнение технических требований к иллюстрациям.

1.2. Согласие автора на конечную ч/б печать из цветной версии и выполнение соответствующих требований (п. 3).

2. Дополнительные требования к цветным иллюстрациям:

2.1. Иллюстрации должны содержать только 8-битный цвет;

2.2. Цветовое пространство CMYK.

3. При согласии автора на ч/б печать цветной иллюстрации для бумажной версии без подготовки дополнительной ч/б версии должны выполняться следующие требования:

3.1. Цвета линий и объектов должны выбираться таким образом, чтобы исключить возможную потерю информативности, авторам рекомендуется предварительно распечатывать такие иллюстрации на ч/б принтере для проверки видимости и различимости цветов, а также избегать указаний

на цвета в подрисовочных подписях, заменяя (дополняя) их цифрами;

3.2. Цветные линии графиков желательно размечать обозначениями, цифрами или спецсимволами или делать различающиеся типы линий для каждого цвета;

3.3. Цветные области на иллюстрациях желательно размечать различающимися обозначениями или спецсимволами, а не одинаковыми разных цветов;

3.4. Если цветовое разделение областей находится примерно в одном цветовом тоне, то желательно провести тонкую линию границы между ними;

3.5. При большом количестве цветных областей в схожих цветовых тонах желательно дополнительно обозначить области символами или штриховкой;

3.6. Все надписи и обозначения желательно делать не цветными, а черными или белыми, в зависимости от подложки.

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) статей указан на сайте электронной библиотеки: www.elibrary.ru (там же можно приобрести электронную версию статьи (всего номера журнала) с цветными рисунками).

Работа с электронной корректурой. Авторам высылается по электронной почте PDF-файл верстки статьи, просмотренный корректором. Файлы можно прочитать и отредактировать с помощью программы Acrobat Reader (версии 9 и выше), которую можно бесплатно скачать через интернет: <http://get.adobe.com/reader/>.

Замечания нужно вносить прямо в PDF-файл статьи, используя панель инструментов “Комментарии и пометки” бесплатной программы Adobe Reader версии 9+. Не используйте другие программы для правки PDF-файлов, иначе авторские замечания могут быть потеряны при автоматической обработке ответов. Нельзя изменять название PDF-файла статьи и тему e-mail-сообщения по той же причине.

Рекомендации по внесению исправлений в PDF-файл:

1. Откройте PDF-файл статьи программой Adobe Reader.

2. Если панель инструментов “Комментарии и пометки” не присутствует на экране, ее можно вызвать для быстрого доступа:

2.1. В меню “Инструменты” выбрать “Настроить панели инструментов...”. В открывшемся окне нужно отметить те инструменты, которые Вы собираетесь использовать. Нажать “ОК”.

3. Для использования инструментов правки текста необходимо выбрать нужный фрагмент текста в файле и нажать кнопку соответствующего инструмента:

3.1. Удалить текст: инструмент “Вычеркивание текста” (красный цвет).

3.2. Заменить текст: инструмент “Заменить выделенный текст” (синий цвет).

3.3. Вставить текст: “Вставить текст на место курсора”.

4. Для использования инструментов рисования и вставки заметок необходимо сначала выбрать инструмент, а затем указать место в тексте.

5. Если Вам необходимо вставить или заменить текст со сложным форматированием или специфическим шрифтом, наберите его в MS Word, скопируйте и вставьте в заметку или используйте инструмент “Выносная строка”. Символы, которые при такой вставке теряют форматирование, можно скопировать инструментом “Снимок” и вставить, используя инструмент “Штамп”, нарисовать инструментом “Карандаш” или описать словами.

6. При правке сложных формул и рисунков ссылайтесь на оригинал, используйте инструмент “Карандаш” или копируйте инструментом “Снимок” и вставляйте, используя инструмент “Штамп”.

7. *Правка должна быть понятной и видимой при визуальном просмотре страницы. Не вставляйте объекты поверх существующего текста.*

8. В исключительных случаях, когда правку невозможно внести в PDF-файл статьи (например, замена рисунка), можно приложить к письму нужный файл в соответствующем месте с помощью инструмента “Присоединить файл”. Рядом необходимо разместить комментарий, объясняющий, что на что и по какой причине меняется.

9. Для повторяющихся исправлений используйте поиск (Ctrl + F).

Рецензирование. Статьи, представляемые в журнал “Исследование Земли из космоса” РАН, направляются на отзыв рецензенту. В ряде случаев оказывается необходимым дополнительное рецензирование.

При получении авторами копий рецензий, указывающих на необходимость доработки статьи, их ответ и доработанный материал рукописи должны быть получены редакцией не позднее, чем через один месяц. В противном случае статья считается взятой авторами обратно.

Редколлегия оставляет за собой право отклонения рукописей с краткой мотивировкой причины отказа. Рукописи авторам не возвращаются.

Англоязычная версия. Англоязычная версия настоящего журнала публикуется ежегодно в виде отдельного тома (в годовом объеме всех шести номеров, выпускаемых за год на русском языке) к англоязычному варианту журнала “Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics”, Nos. 9, 12 (English translation of selected articles from “Issledovanie Zemli iz Kosmosa”).

Просим авторов придерживаться указанных Правил и тщательно готовить статьи. Рукописи, оформленные с нарушением Правил, могут быть возвращены авторам. Спасибо всем, кто будет способствовать улучшению нашего журнала, — мы признательны Вам за сотрудничество.

Редколлегия журнала