

ISSN 0205-9614

Номер 3

Май - Июнь 2023



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2023

Использование космической информации о Земле

- Аномальная геодинамика перед землетрясением 2023 г. в Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии 2018–2023 гг.
В. Г. Бондур, Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев 3
- Особенности регистрации обрушений ветровых волн с беспилотных летательных аппаратов
А. Е. Кориненко, В. В. Малиновский, А. А. Кубряков 13
- Оценка индекса NDVI как источника информации о наземной фитомассе в степях
А. В. Хорошев, О. Г. Калмыкова, Г. Х. Дусаева 27
- Анализ влияния антропогенных нагрузок на процессы опустынивания в Северном Прикаспии по спутниковым данным
С. С. Шинкаренко, А. А. Выприцкий, А. А. Васильченко, А. Н. Берденгалиева 44
-

Методы и средства обработки и интерпретации космической информации

- Развитие модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин на основе использования материалов космической съемки
А. С. Викторов, В. Н. Капралова, Т. В. Орлов 58
-

Физические основы исследования Земли из космоса

- Определение водозапаса облачности по данным радиометра МСУ-ГС КА Арктика-М № 1
А. А. Филей, Ю. А. Шамилова 70
- Диэлектрическая модель верхнего органического слоя лесных почв для частоты 435 МГц
А. Ю. Каравайский, Ю. И. Лукин 81
-
-

Contents

No. 3, 2023

Utilization of the Earth Space Data

- Anomalous Geodynamics before the 2023 Earthquake in Turkey According to Radar Interferometry 2018–2023
V. G. Bondur, T. N. Chimitdorzhiev, and A. V. Dmitriev 3
- Registration Peculiarities of Wind Waves Breaking From Unmanned Aerial Vehicles
A. E. Korinenko, V. V. Malinovsky, and A. A. Kubryakov 13
- Evaluation of the NDVI Index as a Source of Information on Aboveground Phytomass in Steppes
A. V. Khoroshev, O. G. Kalmykova, and G. Kh. Dusaeva 27
- Analysis of Anthropogenic Influence on Desertification Processes in the Northern Caspian Region According to Satellite Data
S. S. Shinkarenko, A. A. Vypritskiy, A. A. Vasilchenko, and A. N. Berdengalieva 44
-

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation

- Developing the Model of the Morphological Pattern for Thermokarst Plains with Fluvial Erosion Involving Remote Sensing Data
A. S. Victorov, V. N. Kapralova, and T. V. Orlov 58
-

Earth Research from Space Physical Ground

- Retrieval of Cloud Liquid Water from MSU-GS Data On-Board Arctica-M No. 1
A. A. Filei and Yu. A. Shamilova 70
- Dielectric Model of the Upper Organic Layer of Forest Soils for a Frequency of 435 MHz
A. Yu. Karavayskiy and Yu. I. Lukin 81
-
-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНОМАЛЬНАЯ ГЕОДИНАМИКА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 2023 г. В ТУРЦИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ 2018–2023 гг.

© 2023 г. В. Г. Бондур^{а, *}, Т. Н. Чимитдоржиев^{а, б}, А. В. Дмитриев^б

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

^бИнститут физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 04.04.2023 г.

На основе результатов обработки 437 радиолокационных интерферограмм, полученных по данным радиолокатора спутника Sentinel-1 в период с начала 2018 г. до начала разрушительной сейсмической активности, произошедшей в Турции в феврале 2023 г., с использованием метода Stacking InSAR построены поля скоростей смещения блоково-разломной структуры и выявлены основные геодинамические процессы в районе Восточно-Анатолийского разлома. Установлены аномальные смещения блоков вдоль этого разлома, которые приурочены к землетрясению с магнитудой 6.7, состоявшемуся 24 января 2020 г. С использованием кластерного анализа временных рядов полей скоростей установлены зоны напряженно деформированного состояния основных блоков, в период, предшествующий этому землетрясению. Показано, что эпицентры землетрясений, произошедших в феврале 2023 г., расположены в районе этих зон. Сделан вывод о необходимости использования такой методики для оценки напряженно деформированного состояния с целью прогнозирования сейсмоактивности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиолокационная интерферометрия, землетрясения, метод взвешенного усреднения интерферограмм, Sentinel-1

DOI: 10.31857/S0205961423030090, EDN: RCCNQC

ВВЕДЕНИЕ

За время прошедшее после землетрясения с магнитудой 7.8, состоявшегося 6 февраля 2023 г., вдоль Восточно-Анатолийского разлома (ВАР) произошло несколько сильных землетрясений с магнитудами $6 \leq M \leq 7.8$ и более 200 афтершоков с магнитудами $4 \leq M < 6$ (МЧС России, 2023; Служба Срочных Донесений, 2023). В результате этой сейсмической активности в Турции погибли более 50 тыс. человек, ранены свыше 115 тыс. человек. Экономический ущерб превысил 104 млрд дол. США. На территории Сирии погибли 8.5 тыс. человек и пострадали более 14.8 тыс. человек. Как и ранее при разрушительных землетрясениях, вновь становится актуальным вопрос о решении проблемы поиска предвестников подобной аномальной сейсмической активности для прогноза и уменьшения ее катастрофических последствий (Соболев, Пономарев, 2003).

Одним из перспективных направлений проведения исследований для решения этой проблемы является использование методов и технологий дистанционное зондирование Земли из космоса, позволяющих регистрировать аномальные вариации

различных геофизических полей, возникающие в процессе подготовки и протекания сейсмических событий. При этом наиболее перспективным является совместный анализ таких аномалий, выявленных по спутниковым данным (Бондур и др., 2022а), а также комплексирование этих результатов с результатами, полученными другими методами, в том числе, с использованием данных, полученных спутниковыми навигационными системами (Бондур и др., 2007; Михайлов и др., 2010) методами геомеханического моделирования (Бондур и др., 2016а, 2016б, 2010) и др.

Одним из перспективных направлений дистанционных исследований сейсмоопасных территорий является применение методов радарной интерферометрии для оценки динамики блоково-разломной структуры (Бондур и др., 2021б; Михайлов и др., 2010). В работах (Бондур и др., 2021а, 2021б) на примере землетрясений в районе Байкальского рифта, показана стабилизация деформаций блоковой структуры (в 2020 г.) в период, предшествующий данной сейсмической активности, по сравнению с предыдущими периодами времени (2018–2019 гг.). Сделан вывод о стабилизации (сейсмодеформационном затишье)

в момент близкий к предельному напряженно-деформированному состоянию, после которого произошло землетрясение.

В настоящей работе на основе анализа радиолокационных интерферограмм, полученных по данным радиолокатора спутника Sentinel-1, в период с начала 2018 г. до сейсмической активности 2023 г. на территории Турции, исследованы поля скоростей смещений блоково-разломной структуры. На основании результатов этих исследований выявлялись зоны напряженно деформированного состояния основных блоков в районе Восточно-Анатолийского разлома в период времени, предшествующий землетрясению 2023 г. (Бондур, Воронова, 2020). Показано, что эпицентры землетрясений были расположены в районе этих зон.

ВЫБОР МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследования, описанные в работах (Бондур и др., 2021а, 2021б) были выполнены с использованием методов интерферометрии постоянных рассеивателей (Permanent Scatterers – PS InSAR) (Ferretti et al., 2001) и малых базовых линий (Small Baseline Subset – SBAS) (Berardino et al., 2002; Феокистов и др., 2015а, 2015б). Эти методы позволяют оценивать деформации по дискретно расположенным точечным рассеивателям или площадным участкам с высокими значениями интерферометрической когерентности. Такие измерения на протяженных участках (в случае интерферометрического режима полоса радиолокационной съемки Sentinel-1 составляет 250 км) сложно интерпретировать, поскольку пространственное распределение этих точечных рассеивателей и высоко когерентных участков не равномерно. Интерполяция в промежутках между дискретными точками и небольшими фрагментами (Филатова и др., 2021) или сегментация, в том числе путем комплексирования с другими данными дистанционного радиолокационного зондирования (Бондур и др., 2022 б), эффективны в большей степени на небольших урбанизированных фрагментах, на территориях с многочисленными каменистыми уступами и другими небольшими участками с высокой когерентностью радиолокационного эхо-сигнала. Поэтому для непрерывных площадных измерений напряженно деформированного состояния земной коры следует использовать другие методы.

Современные методы дистанционного зондирования во многих случаях предполагают применение технологий обработки больших объемов спутниковых данных (Dai et al., 2018; Koyama et al., 2019; Nof et al., 2018; Sandwell and Price, 1998; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021). В настоящем исследовании также предлагается оценить динами-

ку деформаций, предшествующих землетрясению, путем обработки больших объемов радарных данных методом взвешенного усреднения интерферограмм (Stacking-InSAR) (Dai et al., 2018; 2019; Nof et al., 2018; Sandwell and Price, 1998; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021). Результаты применения этого метода сопоставимы с результатами, полученными методом малых базовых линий (Zhang et al., 2021). Так в работе (Zhang et al., 2021) на примере выявления оползней выполнено сравнение метода взвешенного усреднения интерферограмм и метода SBAS. Сделан вывод, что большинство результатов, полученных с помощью этих двух методов, согласуются. В общей сложности с использованием методов Stacking-InSAR и SBAS было выявлено 72 и 77 потенциальных оползней соответственно. Из них 67 потенциальных оползней были идентифицированы обоими методами, что указывает на их высокое совпадение (Zhang et al., 2021). Однако метод SBAS лучше идентифицирует оползни с небольшими смещениями. В то время как метод Stacking-InSAR более эффективен для обнаружения оползней при больших смещениях, а также при низкой когерентности региона исследования. Вместе с тем в работе (Xu et al., 2022) показана лучшая эффективность метода Stacking-InSAR по сравнению с методом SBAS для обнаружения деформаций земной поверхности в местах подземной добычи угля.

Как показано в работах (Dai et al., 2018; Nof et al., 2018; Xu et al., 2022; Zhang et al., 2021) метод Stacking-InSAR эффективен для определения динамики различных природных структур, поэтому можно предположить аналогичную эффективность при выявлении сдвигов крупных геологических структур в период, предшествующий землетрясению 2023 г. При этом по аналогии с работой (Yi et al., 2023) будем считать, что за счет усреднения множества интерферограмм нивелируется влияние атмосферы.

Ранее в работе (Weiss et al., 2020) на основе анализа результатов измерений с помощью глобальных спутниковых навигационных систем и радиолокационных интерферометрических данных, полученных со спутника Sentinel-1, за 5 летний период, начиная с 25 октября 2014 г. (состояние на эту дату принято за начало отсчета деформаций), продемонстрировано движение Анатолийской плиты против часовой стрелки на запад, относительно гигантской Евразийской плиты со скоростями различных фрагментов до 20 мм/год. В случае восходящей орбиты спутника отмечалось также разнонаправленное смещение Анатолийской и Аравийской плит вдоль Восточно-Анатолийского разлома (ВАР), соответственно к радару и от него вдоль направления обзора спутникового радара (Line of sight – LOS). Это направление для восходящей орбиты практически

Таблица 1. Количество развернутых интерферограмм

Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Количество интерферограмм	84	88	86	89	87	3
Накопительное с 2018 г.	—	172	258	347	434	437

параллельно ВАР, что позволяет фиксировать смещения вдоль него.

Принимая во внимание указанное преимущество радарных данных Sentinel-1, полученных на восходящей орбите, для оценки смещений вдоль ВАР, в настоящей работе воспользуемся этими данными для оценки напряженно-деформированного состояния перед исследуемым землетрясением. Для сравнения, временной диапазон измерений будет рассмотрен с перекрытием по времени с периодом исследований, описанных в работе (Weiss et al., 2020) – с начала 2018 г. по 4 февраля 2023 г. Это позволит выполнить сопоставление результатов интерферометрии в промежутки времени с начала 2018 г. по август 2019 г.

Метод Stacking-InSAR был первоначально предложен в работе (Sandwell and Price, 1998) как простой и эффективный метод обработки больших объемов временных рядов данных радарной интерферометрии. С помощью метода Stacking-InSAR могут быть измерены равномерные площадные смещения поверхности с точностью до нескольких мм/год, что доказано сравнением с полевыми геодезическими измерениями (Strozzi et al., 2000). Основным преимуществом этого метода является возможность получения непрерывного поля скоростей смещения практически всех пикселей изображения вдоль направления на спутник.

Суть метода сводится к суммированию взвешенных интерферометрических фаз, полученных в последовательные промежутки времени, и оценке накопленной интерферометрической фазы. Предполагается, что долговременные смещения земной поверхности соответствуют линейной зависимости, а фазовый шум (включая влияние атмосферы) является случайным во времени. Вес каждой интерферометрической пары при суммировании зависит от ее временной базы.

Рассмотрим N независимых интерферограмм с временными базами ΔT_j ($j = \overline{1, N}$) и соответствующий набор фаз φ_j после процедур их разворота. Среднюю скорость изменения фазы, описывающей смещения, можно записать в виде (Zhang et al., 2021)

$$\bar{\varphi} = \frac{\sum_{j=1}^N \varphi_j \Delta T_j}{\sum_{j=1}^N \Delta T_j^2}.$$

Тогда средняя скорость деформаций вдоль линии обзора радиолокатора выражается формулой

$$v_{\text{деф}} = \lambda \bar{\varphi} / 4\pi.$$

Здесь λ обозначает длину волны радиолокатора.

Для расчетов использовались данные радиолокатора Sentinel-1A ($\lambda = 5.6$ см), полученные в период с 1 января 2018 г. по 4 февраля 2023 г. на восходящей орбите. Всего было обработано 437 изображений развернутой интерферометрической фазы (см. табл. 1). Скорость смещений рассчитывалась с годичным накоплением: сначала за весь 2018 г. (84 интерферограммы), затем суммарно за 2018–2019 гг. (172 интерферограммы), далее за 2018–2020 гг. (258 интерферограмм) и т.д. Все изображения были получены с относительной орбиты 116, кадр 119 с временной интерферометрической базой 12, 24 и 36 дней. Размер пространственной интерферометрической базы для данных, используемых при расчете интерферограмм, не превышал 150 м.

Для обработки больших объемов радиолокационных данных был использован современный функционал онлайн платформы Alaska Satellite Facility’s Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3) (ASF Data Search, 2023; Hogenson et al., 2020). Эта онлайн платформа предоставляет доступ к радиолокационным данным Sentinel-1. Кроме того она позволяет выбирать данные для SBAS InSAR и выполнять интерферометрическую обработку, начиная от совмещения изображений до получения развернутой фазы с помощью программного обеспечения GAMMA. Временные ряды последней с пространственным разрешением 40 м и были использованы для расчетов методом Stacking InSAR.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлена карта расположения эпицентров землетрясений, которые произошли на территории Турции в феврале 2023 г. с магнитудами 6.0–8.0 (обозначены красными звездочками), 5.0–5.9 (обозначены оранжевыми кружками), 4.0–4.9 (обозначены желтыми кружками), а также 24 января 2020 г. с магнитудой 6.7 (обозначено красной 4-лучевой звездочкой) и два сильных землетрясения с магнитудами в диапазоне 5.0–5.9 (обозначены оранжевыми 4-лучевыми звездочками), состоявшиеся в 2020 году (Бондур, Воронова, 2020).

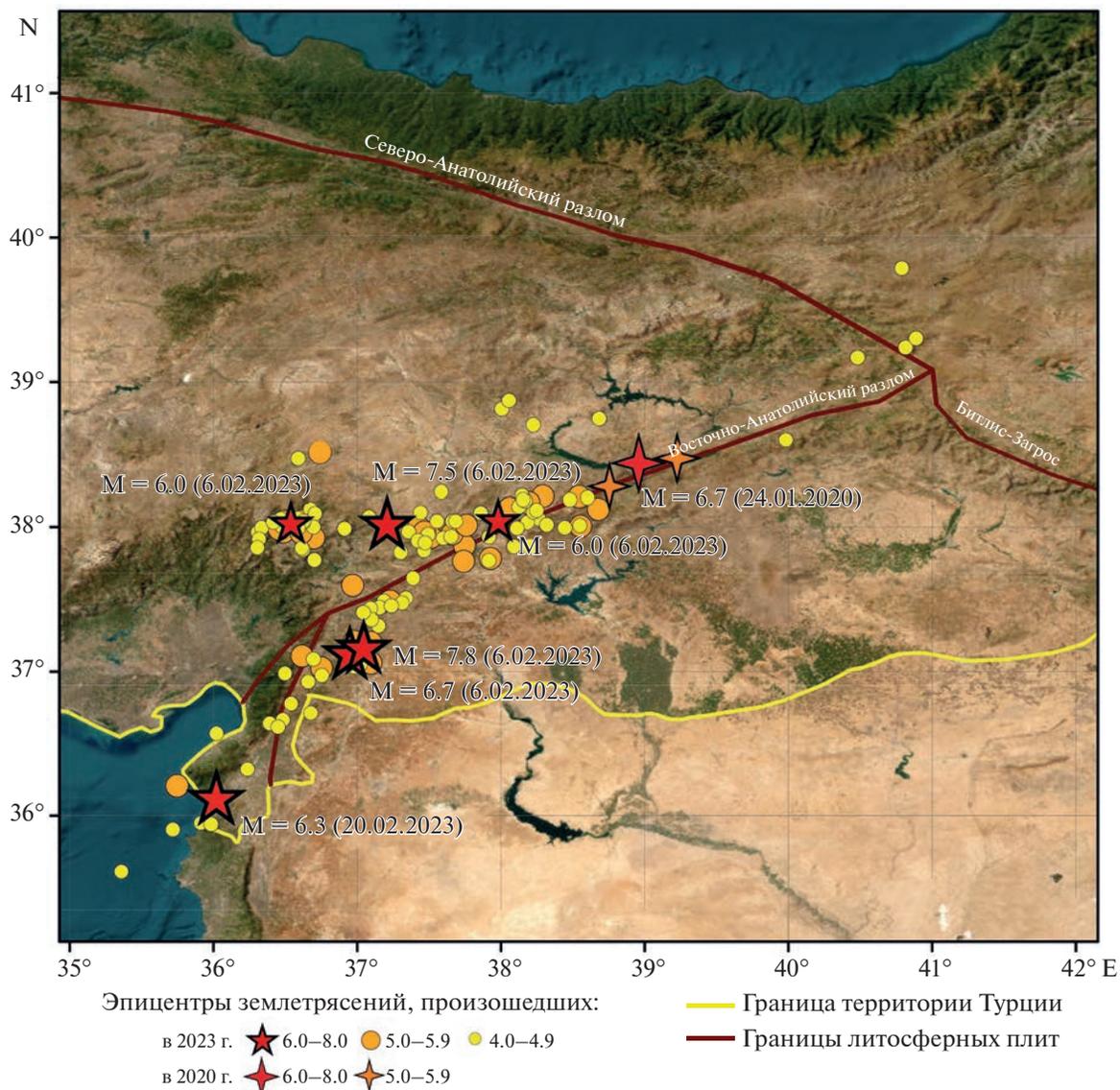


Рис. 1. Карта расположения эпицентров землетрясений, произошедших на территории Турции в феврале 2023 г. с магнитудами 6.0–8.0, 5.0–5.9, 4.0–4.9, а также 24 января 2020 г. с магнитудой 6.7 и двумя сильными землетрясениями магнитудами из диапазона 5.0–5.9, состоявшимися в 2020 году.

На рис. 2 представлены результаты расчетов полей средней скорости смещений (вдоль направления на спутник (красная стрелка в верхнем левом углу рис. 2), выполненных с использованием метода Stacking InSAR. Эпицентры землетрясений, произошедших в 2023 г., в контурах изображений, приведенных на рис. 2, обозначены 8-ми лучевыми красными звездочками в левой части. Сплошными красными линиями обозначен Восточно-Анатолийский разлом, пунктирными линиями обозначены известные глобальные геологические разломы (Styron and Pagani, 2020).

Поле скоростей за 2018 г., представленное на рис. 2, а согласуется с усредненными временными результатами за 2014–2019 гг., приведенными

в работе (Weiss et al., 2020), что является определенной валидацией полученных результатов.

Рассмотрим теперь последующие годовые периоды, для которых результаты расчетов полей средней скорости смещений представлены на рис. 2, б, в, г, д. При рассмотрении будем принимать во внимание, что измерения, описанные в работе (Weiss et al., 2020), завершились в августе 2019 г., а суммарный результат продемонстрировал смещения до 20 мм/год по всей Анатолийской плите и прилегающим территориям. На рис. 2, б показано поле скоростей (период времени 2018 и полный 2019 гг.), которое согласуется по направлению, но отличается по величинам от такового, приведенного в работе (Weiss et al., 2020).

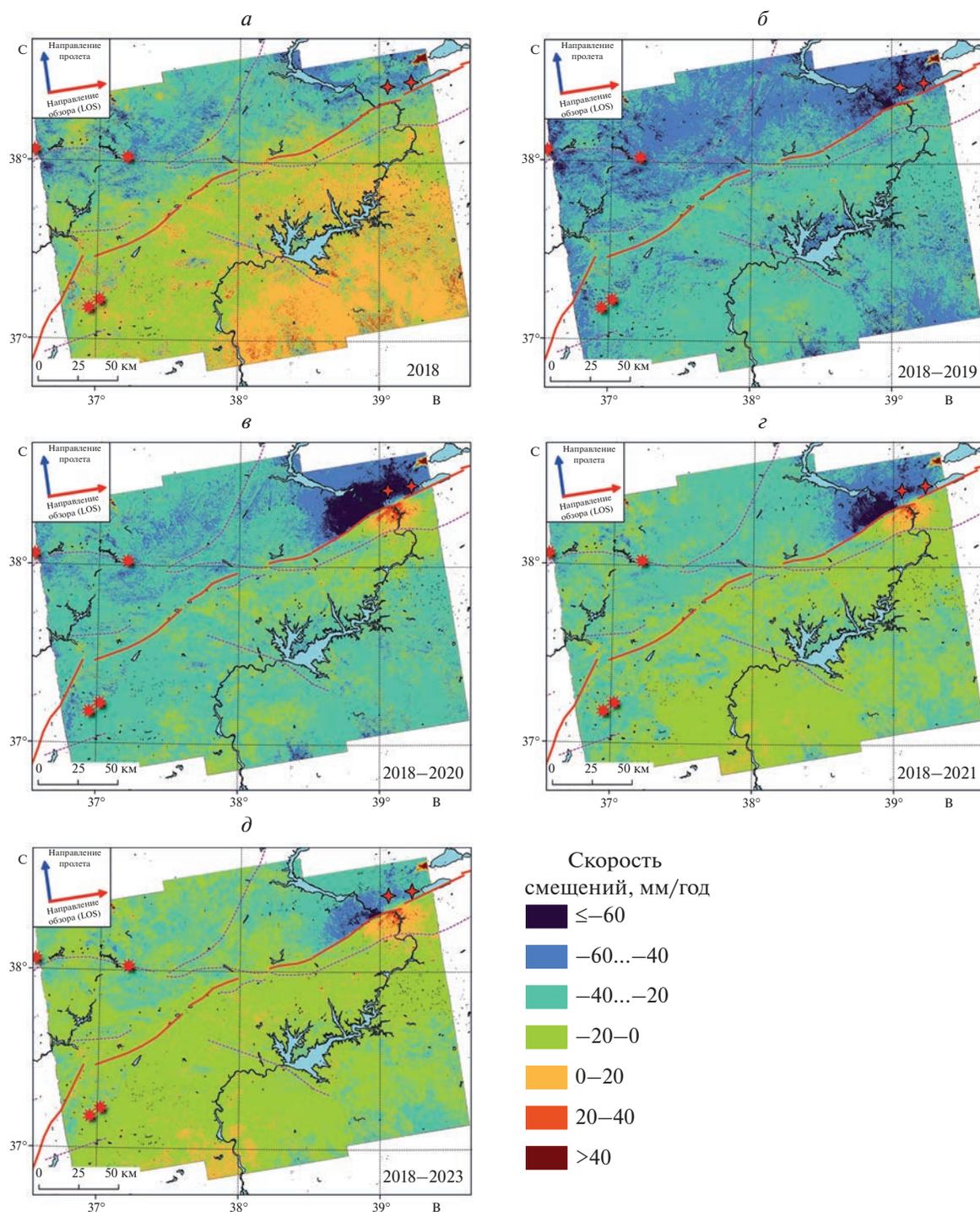


Рис. 2. Поля скоростей вдоль направления LOS и интерферограмма: *а* – поле скоростей за 2018 г., *б* – за 2018–2019 гг., *в* – за 2018–2020 гг., *г* – за 2018–2021 гг., *д* – за 2018–2022 и январь–февраль 2023 г. до землетрясения.

Это означает, что изменения по величине на значительной части изображения, представленного на рис. 2, *б*, произошли в период с августа по конец декабря 2019 г. При этом максимальные скорости (черный цвет, соответствующий значениям,

более 60 мм/год) отмечались в северо-восточной части изображения, где позднее в 2020 г. произошли два крупных землетрясения (обозначены на рис. 2, *б* двумя красными 4-лучевыми звездочками в правой части изображений). Одно из этих

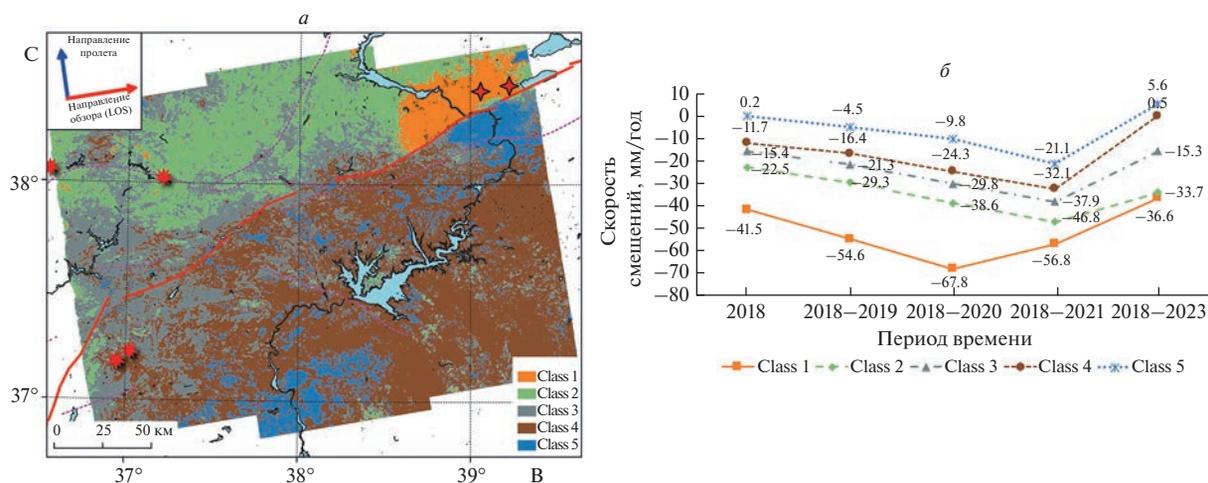


Рис. 3. Результаты кластерного анализа: *а* – пространственное распределение кластеров, *б* – временная динамика кластеров.

землетрясений с магнитудой 6.7 состоялось 24 января 2020 г. (M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020).

На следующем рис. 2 в предыдущие поля скоростей смещений дополнены расчетами за 2020 г. Анализ рис. 2, *в* показал, что на участке повышенной сейсмичности аномальная геодинамика с увеличением скорости вдоль LOS в направлении на спутник продолжилась с существенным увеличением площади (черный цвет на рис. 2, *в*). При этом с южной стороны ВАР, на меньшей площади (оттенки желто-красного цвета) по сравнению с вышеописанной аномалией, увеличилась скорость смещения Аравийской плиты в противоположном направлении. Вся эта аномалия возникла в результате сейсмического события, произошедшего 24 января 2020 г. (M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020).

Таким образом, в 2020 г. на небольшом участке ВАР образовался существенный градиент скоростей. Фрагмент Анатолийской плиты двигался в направлении на спутник со скоростью более 60 мм/год, а симметрично относительно ВАР фрагмент Аравийской плиты смещался в противоположном направлении со скоростью более 40 мм/год.

Судя по следующим рис. 2, *г* и 2, *д*, аномальный участок с северной стороны ВАР уменьшался, а с южной стороны ВАР в период с января 2022 г. по 4 февраля 2023 г. симметричный участок увеличивался, т.е. происходило перераспределение участков напряженно деформированного состояния.

Для дальнейшего анализа выполнена кластеризация изображений, представленных на рис. 2, известным методом Isodata. Для этого было сформировано соответствующее 5-канальное изобра-

жение: 1 канал – поле скоростей за 2018 г., 2 канал – поле скоростей за 2018–2019 гг. и т.д. В качестве основного входного параметра было указано количество кластеров от 5 до 10.

В итоге применения процедуры кластеризации было получено пространственное распределение поля скоростей на кластеры, которое приведено на рис. 3, *а*. На рис 3, *б* приведена временная динамика средней скорости этих кластеров. Цвета обозначающие кластеры на рис. 3, *а* и 3, *б* совпадают. Как отмечалось выше, это относительная скорость смещений, которая рассчитывалась по отношению к январю 2018 г.

Пространственное распределение кластеров, приведенное на рис. 2, *а*, будем интерпретировать как отдельные блоки земной коры, перемещающиеся с различными скоростями. Оранжевым цветом обозначен class 1 – это аномальный участок черного цвета на рис. 2, который интенсивнее по сравнению с другими смещается вдоль направления LOS на спутник (см. линию оранжевого цвета на рис. 3, *б*). Максимальная скорость (по модулю) этого блока доходила до 67.8 мм/год за период 2018–2020 гг. Таким образом фактически произошло косейсмическое увеличение скорости в 2020 г.

В последующие годы скорость этого блока снижалась, что, по-видимому, связано с передачей части импульса соседним блокам с соответствующим увеличением их скорости. Этот эффект примечателен постепенной передачей импульса и объединением с блоковой структурой class 2 (зеленого цвета на рис. 3), т.к. в момент, предшествующий землетрясению эти два блока двигались одинаково. Различия в скоростях этих блоков (36.3 и 33.7 мм/год), перед землетрясением, не превышали значение 4 мм/год, которое,

согласно работе (Strozzi et al., 2000), является средней величиной невязки между результатами полевых геодезических измерений и дистанционных интерферометрических измерений при помощи Stacking InSAR. Совместное движение этих блоков с равной скоростью означает отсутствие между ними напряженно – деформированного состояния в 2022 г. и период, предшествующий землетрясению 2023 г.

Аналогичным образом, в период 2022–2023 гг. перед землетрясением, существенно уменьшилось различие скоростей (до 5.1 мм/год) для class 4 и 5 (коричневый и синий цвета на рис. 2) по сравнению с предыдущими периодами времени (10–14 мм/год). При этом оба блока стали двигаться в направлении от спутника, относительно временной точки отсчета – начала 2018 г. Примечательно, что, ранее блоки, соответствующие классам class 3 и class 4 (серый и коричневый цвета на рис. 3), имели величины скоростей с различием 5.8 мм/год.

Из анализа описанных геодинамических процессов следует, что в период времени перед землетрясением, состоявшемся 6 февраля 2023 г. ($M = 7.6$), наибольшие различия скоростей смещений вдоль LOS возникли между указанными парами классов (1 и 2, а также 4 и 5) и блоком class 3 (серый цвет на рис. 3). Это означает, что возникло напряженно – деформированное состояние между блоком, соответствующим class 3, и другими блоками. В тоже время наибольшее различие скоростей отмечается для пар class 1–2 и class 4–5. Однако принимая во внимание историческую разнонаправленность геодинамики этих блоков (фрагментов Анатолийской и Аравийской плит) вдоль ВАР (Weiss et al., 2020), можно считать, что эта историческая геодинамика сохраняется. Тогда севернее ВАР возникало напряженно-деформированное состояние в северо-западной части за счет подпора совокупности блоков class 1 (оранжевый) и 2 (зеленый цвет) на блок class 3 (серый цвет). А южнее ВАР объединенный блок 4–5 (коричневый и синий цвета) сдвигается в восточную сторону удаляясь от блока class 3 в юго-западной части изображения. Это свидетельствует о том, что здесь возникало напряженно – деформированное состояние за счет растяжения. Именно в этой части территории 6 февраля 2023 г. произошел первый сейсмический толчок магнитудой 7.8, который послужил триггером для других толчков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате использования современных технологий обработки больших объемов радиолокационных интерферометрических данных (437 интерферограмм за период с 2018 по 4 февраля 2023 г.) на основе применения метода Stacking InSAR бы-

ли построены временные поля скоростей смещений блоковой структуры в районе аномальной по разрушительности серии землетрясений, произошедших в феврале 2023 г. на территории Турции. С их помощью были выявлены аномальные смещения вдоль Восточно-Анатолийского разлома, которые вызваны землетрясением магнитудой 6.7, состоявшемся 24 января 2020 г.

С использованием кластерного анализа временных рядов полей скоростей в период времени, предшествующий разрушительному землетрясению 6 февраля 2023 г. магнитудой 7.8, были выявлены зоны напряженно – деформированного состояния основных блоков. Установлено, что фрагменты Анатолийской плиты на границе ВАР имели различные скорости смещений, что в свою очередь образовало зону сжатия к северо-западу от ВАР и зону растяжения к юго-западу от ВАР. В районе этих участков и были расположены эпицентры последующих сейсмических событий, которые в феврале 2023 г. привели к катастрофическим последствиям на территориях Турции и Сирии.

Таким образом, полученные результаты показывают необходимость использования методики оценки напряженно деформированного состояния с целью прогнозирования сейсмоактивности.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания НИИ “Аэрокосмос” № 122011800095-3 и ИФМ СО РАН № 121032500022-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Воронова О.С. Исследования тепловых полей перед сильными землетрясениями в Турции 8 марта 2010 г. ($M = 6.1$) и 24 января 2020 г. ($M = 6.7$) // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 3–16. <https://doi.org/10.31857/S0205961420060032>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016 (а). № 1. С. 120–132. <https://doi.org/10.7868/S000233371601004X>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2016 (б). Т. 466. № 5. С. 598–601. <https://doi.org/10.7868/S0869565216050170>
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Докл. АН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупней-

ших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // Докл. АН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.

Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова Е.В., Воронова О.С. Совместный анализ аномальных вариаций различных геофизических полей по космическим данным при подготовке землетрясения в районе оз. Байкал 22 сентября 2020 Г. (M = 5.6) // Исслед. Земли из космоса. 2022 (а). № 5. С. 3–19. <https://doi.org/10.31857/S0205961422050049>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Оценка реактивации оползня на реке Буряя методами радарной интерферометрии // Докл. АН. Науки о Земле. 2022 (б). Т. 502. № 2. С. 83–89. <https://doi.org/10.31857/S2686739722020025>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Методы радарной интерферометрии и обработки оптических спутниковых изображений для исследования негативных воздействий на окружающую среду (на примере Байкальского ЦБК). // Исслед. Земли Из Космоса. 2021(а). № 5. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S020596142105002X>

Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на Южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Докл. АН. Науки О Земле. 2021 (б). Т. 499. С. 144–150. <https://doi.org/10.31857/S268673972108003X>

Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н. М., Киселева Е. А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли. 2010. № 2. С. 3–16.

МЧС России [Электронный ресурс], URL: <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения 28 марта 2023).
Служба Срочных Донесений [Электронный ресурс], URL http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm (дата обращения 28 марта 2023).

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

Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARSCAPE и данных PCA ASAR/ENVISAT и PAL-SAR/ALOS. Часть 1. Ключевые моменты метода. // Журн. Радиоэлектроники. 2015а. № 9. С. 13. URL <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.pdf>.

Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля SBAS программного пакета SARSCAPE и данных PCA ASAR/ENVISAT и PAL-SAR/ALOS. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журн. Радиоэлектроники. 2015б. № 9. С. 14. URL <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/2/text.pdf>.

Филатова В.М., Назаров И.В., Филатов А.В. Методы и результаты геостатистической обработки радарной интерферометрии на территории Калининградской области // Современные Проблемы ДЗЗ Из Космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 74–82. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-74-82>

ASF Data Search [Электронный ресурс], URL <https://search.asf.alaska.edu/#/> (дата обращения 28 марта 2023).

Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>

Dai K., Liu G., Li Z., Ma D., Wang X., Zhang B., Tang J., Li G. Monitoring Highway Stability in Permafrost Regions with X-band Temporary Scatterers Stacking InSAR // Sensors. 2018. V. 18. P. 1876. <https://doi.org/10.3390/s18061876>

Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. V. 39. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>

Hogenson K., Kristenson H., Kennedy J., Johnston A., Rine J., Logan T., Zhu J., Williams F., Herrmann J., Smale J., Meyer F. Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6917373>

Koyama C.N., Watanabe M., Hayashi M., Ogawa T., Shimada M. Mapping the spatial-temporal variability of tropical forests by ALOS-2 L-band SAR big data analysis // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 233. P. 111372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111372>

M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020, [Электронный ресурс], URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us60007ewc/executive> (дата обращения 28 марта 2023)

Nof R.N., Baer G., Eyal Y., Novali F. Current surface displacement along the Carmel Fault system in Israel from InSAR stacking and PSInSAR // Israel J. Earth Sciences. 2008. V. 57. № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.1560/IJES.57.2.71>

Sandwell D.T., Price E.J. Phase gradient approach to stacking interferograms // J. Geophysical Research: Solid Earth. 1998. V. 103. P. 30183–30204. <https://doi.org/10.1029/1998JB900008>

Strozzi T., Wegmuller U., Werner C., Wiesmann A. Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy // IGARSS 2000 Proceedings (Cat. No.00CH37120). 2000. P. 2239–2241. V. 5. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2000.858368>

Styron R., Pagani M. The GEM Global Active Faults Database // Earthquake Spectra. 2020. V. 36. P. 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>

Weiss J.R., Walters R.J., Morishita Y., Wright T.J., Lazecky M., Wang H., Hussain E., Hooper A.J., Elliott J.R., Rollins C., Yu C., González P.J., Spaans K., Li Z., Parsons B. High-Resolution Surface Velocities and Strain for Anatolia From Sentinel-1 InSAR and GNSS Data // Geophysical Research Letters.

2020. V. 47. P. e2020GL087376.

<https://doi.org/10.1029/2020GL087376>

Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y. Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. P. 3314.

<https://doi.org/10.3390/rs14143314>

Yi Y., Xu X., Xu G., Gao H. Rapid Mapping of Slow-Moving Landslides Using an Automated SAR Processing Platform (HyP3) and Stacking-InSAR Method // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 1611.

<https://doi.org/10.3390/rs15061611>

Zhang L., Dai K., Deng, J. Ge D., Liang R., Li W., Xu Q. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 3662.

<https://doi.org/10.3390/rs13183662>

Anomalous Geodynamics before the 2023 Earthquake in Turkey According to Radar Interferometry 2018–2023

V. G. Bondur¹, T. N. Chimitdorzhiev², and A. V. Dmitriev²

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

²Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Displacement velocity fields of the block–fault structure are constructed and the main geodynamic processes in the area of the East Anatolian fault are revealed based on the results of processing of 437 radar interferograms obtained from the Sentinel-1 radar in the period from the beginning of 2018 to disastrous seismic activity in February 2023 in Turkey by Stacking InSAR method. Anomalous block displacements along this fault have been identified, which are timed to the earthquake of January 24, 2020 (M = 6.7). Zones of stress-strain state of the main blocks in the period preceding the earthquake have been established using cluster analysis of time series of velocity fields. It is shown that the epicenters of February 2023 earthquakes are located in these zones. It is concluded that it is necessary to use such a technique to assess the stress-strain state in order to predict seismic activity.

Keywords: radar interferometry, earthquake, Stacking-InSAR, Sentinel-1

REFERENCES

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Assessment of the Bureya River Landslide Reactivation Using the Persistent Scatterer Interferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 502. P. 1–2. P. 31–36. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22020027>

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Methods of Radar Interferometry and Optical Satellite Image Processing to Study Negative Effects on the Environment (a Case Study of the Baikalsk Pulp and Paper Mill) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021a. V. 57. № 12. P. 1527–1536. <https://doi.org/10.1134/S0001433821120045>

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Tubanov Ts.A., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Analysis of the Block-Fault Structure Dynamics in the Area of Earthquakes in 2008 and 2020 near Southern Lake Baikal by the Methods of Satellite Radiointerferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2021. V. 499. P. 2. P. 648–653. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21080031>

EMERCOM of Russia, available at: <https://en.mchs.gov.ru/> (accessed: March 28, 2023).

FRC RAS Geophysical survey, available at: http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd_news.htm (accessed: March 28, 2023).

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V. The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismic-

ity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2016. V. 52. № 1. P. 117–128.

<https://doi.org/10.1134/S1069351316010043>

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B. Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466. № 2. P. 183–186.

<https://doi.org/10.1134/S1028334X16020100>

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

<https://doi.org/10.1134/S1028334X10010320>

Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblov G.M., Shalimov S.L. Geomechanical models and ionospheric variations related to strongest earthquakes and weak influence of atmospheric pressure gradients // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669.

<https://doi.org/10.1134/S1028334X07040381>

Bondur V.G., Tsidilina M.N., Gaponova E.V., Voronova O.S. Combined Analysis of Anomalous Variations in Various Geophysical Fields during Preparation of the M5.6 Earthquake near Lake Baikal on September 22, 2020, Based on Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022. V. 58. № 12. P. 1532–1545.

<https://doi.org/10.1134/S0001433822120052>

Bondur V.G., Voronova O.S. Study of Thermal Fields before Strong Earthquakes in Turkey on March 8, 2010 (M = 6.1),

- and January 24, 2020 (M = 6.7) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. № 9. P. 991–1002. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090425>
- Feoktistov A.A., Zakharov A.I., Gusev M.A., Denisov P.V.* Issledovanie vozmozhnostei metoda malykh bazovykh linii na primere modulya SBAS programmnoho paketa SAR-SCAPE i dannykh RSA ASAR/ENVISAT i PALSAR/ALOS. Chast' 1. Klyuchevye momenty metoda (Investigation of the possibilities of the small baseline method using the example of the SBAS module of the SARSCAPE software package and ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS SAR data. Part 1. Key points of the method) // *Zhurnal Radioelektroniki*. 2015a. № 9. P. 13. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/1/text.pdf>.
- Feoktistov A.A., Zakharov A.I., Gusev M.A., Denisov P.V.* Issledovanie vozmozhnostei metoda malykh bazovykh linii na primere modulya SBAS programmnoho paketa SARSCAPE i dannykh RSA ASAR/ENVISAT i PALSAR/ALOS. Chast' 2. Eksperimental'nye rezul'taty (Investigation of the possibilities of the small baseline method using the example of the SBAS module of the SARSCAPE software package and ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS SAR data. Part 2. Experimental results) // *Zhurnal Radioelektroniki*. 2015b. № 9. P. 14. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/2/text.pdf>.
- Filatova V.M., Nazarov I.V., Filatov A.V.* Metody i rezul'taty geostatisticheskoi obrabotki radarnoi interferometrii na territorii Kaliningradskoi oblasti (Methods and results of geostatistical processing of radar interferometry data over Kaliningrad Region territory) // *Sovremennye Problemy DZZ Iz Kosmosa*. 2021. V. 18. № 5. P. 74–82. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-74-82>
- ASF Data Search, available at: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (accessed: March 28, 2023).
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 11. P. 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Dai K., Liu G., Li Z., Ma D., Wang X., Zhang B., Tang J., Li G.* Monitoring Highway Stability in Permafrost Regions with X-band Temporary Scatterers Stacking InSAR // *Sensors*. 2018. V. 18. P. 1876. <https://doi.org/10.3390/s18061876>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* V. 39. P. 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Hogenson K., Kristenson H., Kennedy J., Johnston A., Rine J., Logan T., Zhu J., Williams F., Herrmann J., Smale J., Meyer F.* Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data. 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6917373>
- Koyama C.N., Watanabe M., Hayashi M., Ogawa T., Shimada M.* Mapping the spatial-temporal variability of tropical forests by ALOS-2 L-band SAR big data analysis // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 233. P. 111372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111372>
- M 6.7 earthquake in eastern Turkey, 2020, available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us60007ewc/executive> (accessed: March 28, 2023)
- Mikhailov V.O., Nazaryan A.N., Smirnov V.B., Kiseleva E.A., Tikhotskii S.A., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Polyakov S.A., Diamant M., Shapiro N.* Joint inversion of the differential satellite interferometry and GPS data: A case study of ALTAI (CHUIA) earthquake of september 27, 2003 // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2010. T. 46. № 2. C. 91–103.
- Nof R.N., Baer G., Eyal Y., Novali F.* Current surface displacement along the Carmel Fault system in Israel from InSAR stacking and PSInSAR // *Israel J. Earth Sciences*. 2008. V. 57. № 2. P. 71–86. <https://doi.org/10.1560/IJES.57.2.71>
- Sandwell D.T., Price E.J.* Phase gradient approach to stacking interferograms // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1998. V. 103. P. 30183–30204. <https://doi.org/10.1029/1998JB900008>
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V.* Fizika zemletrasenyiy i predvestniki (Earthquake physics and precursors). Moscow: Nauka, 2003. P. 270 p. (In Russian).
- Strozzi T., Wegmuller U., Werner C., Wiesmann A.* Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy // *IGARSS 2000 Proceedings (Cat. No.00CH37120)*. 2000. P. 2239–2241 V. 5. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2000.858368>
- Styron R., Pagani M.* The GEM Global Active Faults Database // *Earthquake Spectra*. 2020. V. 36. P. 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>
- Weiss J.R., Walters R.J., Morishita Y., Wright T.J., Lazecky M., Wang H., Hussain E., Hooper A.J., Elliott J.R., Rollins C., Yu C., González P.J., Spaans K., Li Z., Parsons B.* High-Resolution Surface Velocities and Strain for Anatolia From Sentinel-1 InSAR and GNSS Data // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. P. e2020GL087376. <https://doi.org/10.1029/2020GL087376>
- Xu Y., Li T., Tang X., Zhang X., Fan H., Wang Y.* Research on the Applicability of DInSAR, Stacking-InSAR and SBAS-InSAR for Mining Region Subsidence Detection in the Datong Coalfield // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. P. 3314. <https://doi.org/10.3390/rs14143314>
- Yi Y., Xu X., Xu G., Gao H.* Rapid Mapping of Slow-Moving Landslides Using an Automated SAR Processing Platform (HyP3) and Stacking-InSAR Method // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 1611. <https://doi.org/10.3390/rs15061611>
- Zhang L., Dai K., Deng, J. Ge D., Liang R., Li W., Xu Q.* Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. P. 3662. <https://doi.org/10.3390/rs13183662>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ОБРУШЕНИЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2023 г. А. Е. Кориненко^{a, b, *}, В. В. Малиновский^{a, b}, А. А. Кубряков^a

^aМорской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

^bРоссийский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: korinenko.alex@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 14.10.2022 г.

Приводятся результаты использования беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для исследования процессов обрушения гравитационных волн. Эксперименты проводились в прибрежной зоне западного Крыма (район г. Севастополь) в диапазоне скоростей ветра от 5.5 до 9.5 м/с. Определение геометрических размеров обрушений и скоростей их движения осуществлялось по видеозаписям морской поверхности, полученных с БПЛА. Показано, что пространственное разрешение трансформированного изображения играет ключевую роль при разделении активной фазы обрушения и остаточной пены. При грубом пространственном разрешении возникают ошибки при определении кинематических характеристик барашков. Доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн, отношение максимальной длины барашка к длине обрушающейся волны, распределение суммарной длины обрушений в интервалах скоростей движения на единице поверхности, полученные с БПЛА при пространственном разрешении лучше 0.5 м, удовлетворительно соответствуют результатам других авторов. Анализ данных показывает, что использование беспилотных летательных аппаратов позволяет исследовать статистические характеристики и кинематику обрушений ветровых волн. В то же время, необходимо учитывать влияние пространственного разрешения в видеокадре, которое при значениях, сопоставимых или превышающих масштаб обрушения может приводить к искажению или пропуску данных измерений.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, дистанционное зондирование Океана, обрушения гравитационных волн, кинематические характеристики обрушений, доля морской поверхности, покрытая барашковой пеной

DOI: 10.31857/S0205961423030041, EDN: TYLTRY

ВВЕДЕНИЕ

Обрушения ветровых волн – это явление на поверхности океана, наблюдаемое при скоростях ветра около 4–5 м/с и выше. Обрушения являются важным элементом при изучении многих динамических процессов верхнего слоя моря: газообмен, поток импульса из атмосферы в океан, диссипация волновой энергии, турбулентное перемешивание в приповерхностном слое моря, формирование атмосферного аэрозоля и морских брызг в атмосфере. (см. например, Babanin, 2009; Бортковский, 2006; Kudryavtsev et al., 2008; Wu et al., 2015; Sutherland, Melville, 2015).

При разрушении гребня гравитационной волны в приповерхностный слой воды вовлекается воздух, образующий воздушные пузырьки, которые и формируют на морской поверхности белые барашки (обрушения) (Thorpe, Hall, 1982; Monahan, O’Muircheartaigh, 1986; Шарков, 2009). Барашковая пена обладает большой отражательной способностью, в следствии чего хорошо контра-

стируют на фоне окружающей морской поверхности. Эта особенность позволяет регистрировать обрушения с помощью фото и видео аппаратуры.

Современные методы идентификации обрушений на фоне морской поверхности позволяют автоматизировать процесс обработки большого массива данных. Это в свою очередь дает возможность оперативно получать информацию о кинематических характеристиках обрушений, выявлять их временную динамику на различных пространственных масштабах (Melville, Matusov, 2002; Gemmrich et al., 2008; Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2011; Sutherland, Melville, 2013).

В настоящее время исследование процессов обрушения гравитационных волн, как правило, осуществляется при помощи оптической аппаратуры с борта самолета, научно-исследовательского судна, стационарных платформ и дистанционных спутников Земли. Экспериментальные данные, получаемые в результате стационарных измере-

ний, имеют высокое пространственное (порядка дециметров и менее) и временное (порядка миллисекунд) разрешение (Gemrich et al., 2008; Sutherland, Melville, 2013; Shemdiman et al., 2014; Korinenko et al., 2018; Korinenko et al. 2020). Как правило, подобные исследования сопровождаются синхронными измерениями параметров атмосферы, течений и поверхностного волнения. Тем не менее, они имеют естественное ограничение — пространственную локальность и небольшой пространственный охват морской акватории. Вследствие этого, стационарные измерения малопригодны для получения информации об изменчивости пространственных характеристиках обрушений на крупномасштабных динамических процессах. Как известно, интенсивность обрушений чувствительна к неоднородностям поверхностных течений, связанных с различными океанскими динамическими процессами (внутренние волны, границы суб- и мезомасштабных течений, фронты), что используется в практических приложениях дистанционного зондирования (Thorpe, Hall, 1987; Dulov et al., 1998; Kubryakov et al., 2021).

Этого недостатка лишены данные, получаемые с самолетных (Бондур, Шарков, 1982; Бондур, Шарков, 1986; Kleiss, Melville, 2010) и космических носителей (Anguelova, Webster, 2006; Anguelova, Bettenhausen, 2019; Kubryakov et al., 2021). К примеру, по данным самолетных измерений выполнен анализ статистических распределений линейных размеров пенных структур (Бондур, Шарков, 1986), рассматривались параметры обрушений в зависимости от разгона волн (Kleiss, Melville, 2010). В работе (Kubryakov et al., 2021) показана возможность использования спутниковых изображений Landsat-8 для исследования влияния суб- и мезомасштабных процессов, температурных фронтов на пространственное распределение полей обрушений гравитационных волн.

Однако, данные спутниковых аппаратов, не позволяют получить высокое пространственное разрешения (порядка дециметров и менее), которое необходимо для детального анализа изменчивости обрушений малых пространственных масштабов. К тому же спутниковые наблюдения не выявляют временную динамику обрушений, поскольку индивидуально обрушение фиксируется в определенный момент его жизни.

В последнее время для научных исследований используются небольшие, беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Современные БПЛА стоят недорого, оборудованы видеокамерами с высокой разрешающей способностью, обладают хорошей стабилизацией. В работах (Klemas, 2015; Brouwer et al., 2015; Holman et al., 2017; Osadchiv et al., 2020; Kubryakov et al., 2021) показано, что БПЛА могут быть использованы в океанологиче-

ских задачах различного профиля (определение скорости поверхностных течений, изучение динамики вдольбереговых течений, батиметрии), в том числе и для изучения волновых характеристик (Yurovskaya et al., 2019; Yurovsky et al., 2021).

Использование БПЛА может оказаться перспективным для исследования процессов обрушения гравитационных волн. В этом случае несомненный интерес представит изучение как временной эволюции геометрических свойств отдельных пенных структур при съемках с высоким пространственным разрешением, так и выявление закономерностей распределения различных характеристик обрушений на больших площадях морских акваторий. Вместе с тем, панорамные наблюдения приводят к ухудшению пространственного разрешения, из-за чего падает точность измеряемых параметров обрушений и увеличиваются минимальные размеры идентифицированных барашков. В этом случае открытым остается вопрос о достоверности дальнейшего расчета таких величин, как доля поверхности, покрытая обрушениями и лямбда функция $\Lambda(c)$ (Phillips, 1985). Нам не удалось найти работ, посвященных анализу регистрации обрушений с БПЛА, в которых изучалась эта проблема.

В настоящей работе рассматривается возможность использования БПЛА для исследования временной динамики процесса обрушения индивидуальных гравитационных морских волн, а также для выявления закономерностей распределения общей запененности поверхности на больших площадях морских акваторий. Проводится сопоставление основных характеристик обрушений, в частности, доли морской поверхности, покрытой барашковой пеной, лямбда распределения с данными стационарных измерений с океанографической платформы в Черном море.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Геометрические характеристики обрушений ветровых волн определялись по видеозаписям морской поверхности, полученных с помощью беспилотного летательного аппарата. В качестве БПЛА использовался летательный аппарат вертикального взлета и посадки DJI MAVIC 2 Enterprise Dual. Квадрокоптер оснащен 3-х осевой стабилизацией, обеспечивающей стабилизированную съемку по заданному азимуту, тангажу и высоте. Управление азимутом и наклоном видеокамеры осуществляется с наземной станции управления. Бортовой контроллер позволяет стабилизировать и удерживать положение и высоту БПЛА. Точность позиционирования в вертикальной плоскости составляет 0.5 м, горизонтальной плоскости — 1.5 м.

Камера квадрокоптера снабжена CMOS матрицей $1/2.3''$, позволяющей записывать видео в формате 4К (3840×2160 пикселей, 30 кадров в секунду). Горизонтальные и вертикальные углы обзора камеры, полученные на основе анализа калибровочной сцены с применением методики (Bouquet, 2001), составляют 65° и 40° соответственно.

Экспериментальные исследования проводились в прибрежной зоне западного Крыма (район г. Севастополь). После того, как все параметры съемки установлены, летательный аппарат поднимался на заданную высоту и зависал над морем на 5–10 мин. Параметры пространственного положения (координаты) и угла визирования видеокамеры относительно горизонта φ в момент работы сохранялись в отдельный файл. Всего было выполнено 7 съемок с БПЛА на высотах от 145 до 520 м над уровнем моря и различными углами визирования морской поверхности.

Скорость ветра оценивалась по реанализу NCMADS с пространственным разрешением 0.25° и временным разрешением – 6 ч.

Общая информация об условиях проведения экспериментов приведена в табл. 1, в которой указаны дата измерений, средние значения скорости ветра U , высота БПЛА над уровнем моря H , угол визирования видеокамеры φ .

В качестве примера на рис. 1 приведено изображение морской поверхности, полученное 09 сентября 2020 г. с высоты 400 м. При данной

Таблица 1. Условия проведения измерений

Дата	U , м/с	H , м	φ , град
25.03.2020	9.5	145	36
23.06.2020	5.5	145	90
23.06.2020	5.5	145	90
09.09.2020	8.5	400	21
09.09.2020	8.5	300	17
29.11.2020	6	210	54
30.01.2021	7.5	520	63

геометрии наблюдения площадь морской поверхности составляет около 154 км^2 . Светлая полоса в центре кадра связана с выносом взвешенного вещества от берега. Данный кадр демонстрирует одно из преимуществ беспилотных летательных аппаратов: возможность наблюдения большой акватории.

Особенности кинематики пенных структур

На первом этапе идентификация барашков по видеозаписям морской поверхности осуществлялась с помощью алгоритма (Mironov, Dulov, 2008). Алгоритм основан на отличии модельного гауссова распределения яркости I в кадре в отсутствие обрушений от фактического распределения яркости в присутствии пенных структур. Обрушения искажают “хвост” нормального распределения

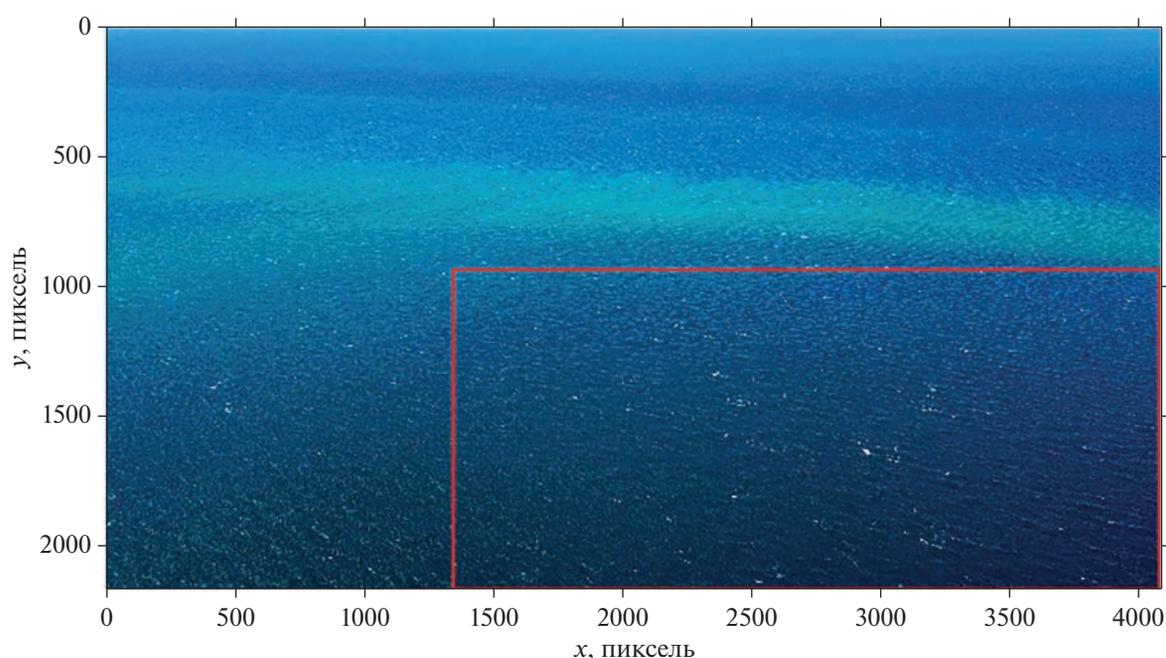


Рис. 1. Пример кадра видеозаписи БПЛА. Красными прямоугольниками отмечена область, в которой производилось выделение обрушений.

$p(I)$ при больших значениях яркости. Уровень яркости I_0 , выше которого наблюдаются искажения $p(I)$, принимался за величину порога, а области морской поверхности с яркостью, превышающей I_0 , рассматривались как пенные структуры.

Последующим и самым важным этапом обработки является выделение активной фазы обрушений и игнорирование растекшейся пены, оставшейся после прохождения барашка. На данном этапе используются кинематические свойства обрушений в различных фазах (Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2010; Kleiss, Melville, 2011).

В то же время, как показал предварительный анализ наших данных, при разделении активной фазы и остаточной пены ключевую роль играет пространственное разрешение Δ видеозаписей. Рассмотрим влияние Δ на определение кинематических характеристик пенных структур.

Для начала кратко остановимся на этапах эволюции пенного образования. Когда гравитационная волна становится неустойчивой, происходит разрушение ее гребня и в поверхностный слой воды вовлекается воздух. В этот момент начинает формироваться пенный барашек (обрушение). Распространяясь с гребнем обрушивающейся волны, пенная область значительно увеличивается в размерах. Со временем позади барашка появляются пятна остаточной пены. Основное различие кинематики фаз выражается в том, что область активного обрушения жестко связана с обрушивающейся волной, и потому движется с ее фазовой скоростью (Phillips, 1985), в то время как движение геометрического центра остаточной пены принимает колебательный характер, отражая орбитальные движения проходящих длинных волн. Время жизни каждой из фаз, так же сильно отличается. Если в активной фазе барашек живет порядка $0.3T-0.8T$ (Phillips et al., 2001; Korinenko et al., 2022), то пассивная фаза существует десятки секунд (Callaghan et al., 2012). Здесь T – период обрушивающейся волны.

Таким образом, к основным признакам обрушения в активной фазе можно отнести следующее: барашек движется в направлении распространения обрушающихся волн с вполне определенной скоростью, и его площадь растет в течение $\sim 0.3T-0.8T$ с (Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2010; Kleiss, Melville, 2011).

На рис. 2, *a–2, в* приведен пример эволюции пенного образования с момента $t = 0$ с, соответствующего началу регистрации обрушения, до момента $t = 3.21$ с, когда на морской поверхности осталось лишь пятно растекшейся пены. Значения Δ показанного на рис. 2 фрагмента видеокадра составляют $\Delta x = 0.3$ м и $\Delta y = 0.5$ м по осям x и y , соответственно. Эволюция геометрических параметров обрушения, выделенного пунктирным

кружочком, подробно показана на рис. 2, *г–2, д*. Как следует из рис. 2, *г–2, д* пенное образование движется поступательно в течение 2.17 с, и в этом интервале времени наблюдается рост площади барашка (рис. 2, *е*). При $t > 2.17$ с координаты геометрического центра пенного образования начинают повторять орбитальные движения, связанные с проходящими длинными волнами. При этом площадь продолжает расти, а затем начинает уменьшаться, из-за распада сплошной белой области на отдельные части. Учитывая кинематические свойства пенной структуры в различных фазах, можно утверждать, что данные правее прямой линии на рис. 2, *г–2, е* относятся к остаточной пене. Соответственно, в течение 2.17 с рассматриваемое обрушение движется в активной фазе со скоростью $c_{br} = \sqrt{(\partial X/\partial t)^2 + (\partial Y/\partial t)^2}$, где X, Y – координаты геометрических центров обрушения (рис. 2, *г, 2, д*). Будем считать эту скорость равной фазовой скорости обрушивающейся волны, как предложено в (Phillips, 1985). Тогда, используя дисперсионное соотношение гравитационных волн на глубокой воде, оценим период несущей волны $T = 2\pi c_{br}/g$, где g – ускорение свободного падения.

Для рассматриваемого случая период обрушивающейся волны составляет $T = 1.5$ с и, соответственно, время жизни в активной фазе оценивается от 0.45 с до 1.2 с (Phillips et al., 2001; Korinenko et al., 2022). Эта оценка времени жизни меньше значения 2.17 с, указанного прямой линией на рис. 2, *г–2, е*. Следует отметить, что площадь в момент обнаружения составляет 0.5 м², а длина гребня равна 0.45 м. Соответственно, обрушение на рис. 2 идентифицировано при помощи порогового метода не в момент его зарождения, а спустя некоторый промежуток времени. В результате, большую часть времени левее прямой линии пенная структура представляет смешанный вид, а именно, заканчивающуюся активную фазу и формирующуюся остаточную пену. Подобная особенность, может быть связана с тем, что при пространственным разрешении несколько дециметров и более остаточная пена на изображениях будет представлять собой не разрозненную пятнистую структуру, а сплошную белую область с продолжающимся вовлечением близко расположенных отдельных пенных структур.

Таким образом, при малом пространственном разрешении отделить обрушение в активной фазе от пассивной примеси достаточно затруднительно.

Следующий случай представлен на рис. 3, где приведен пример эволюции трех отдельных пенных образований с момента $t = 0$ с, когда обрушение под номером 3 идентифицируется впервые, до момента их объединения в видеокadre в цельную структуру. Как видно по серии кадров, пред-

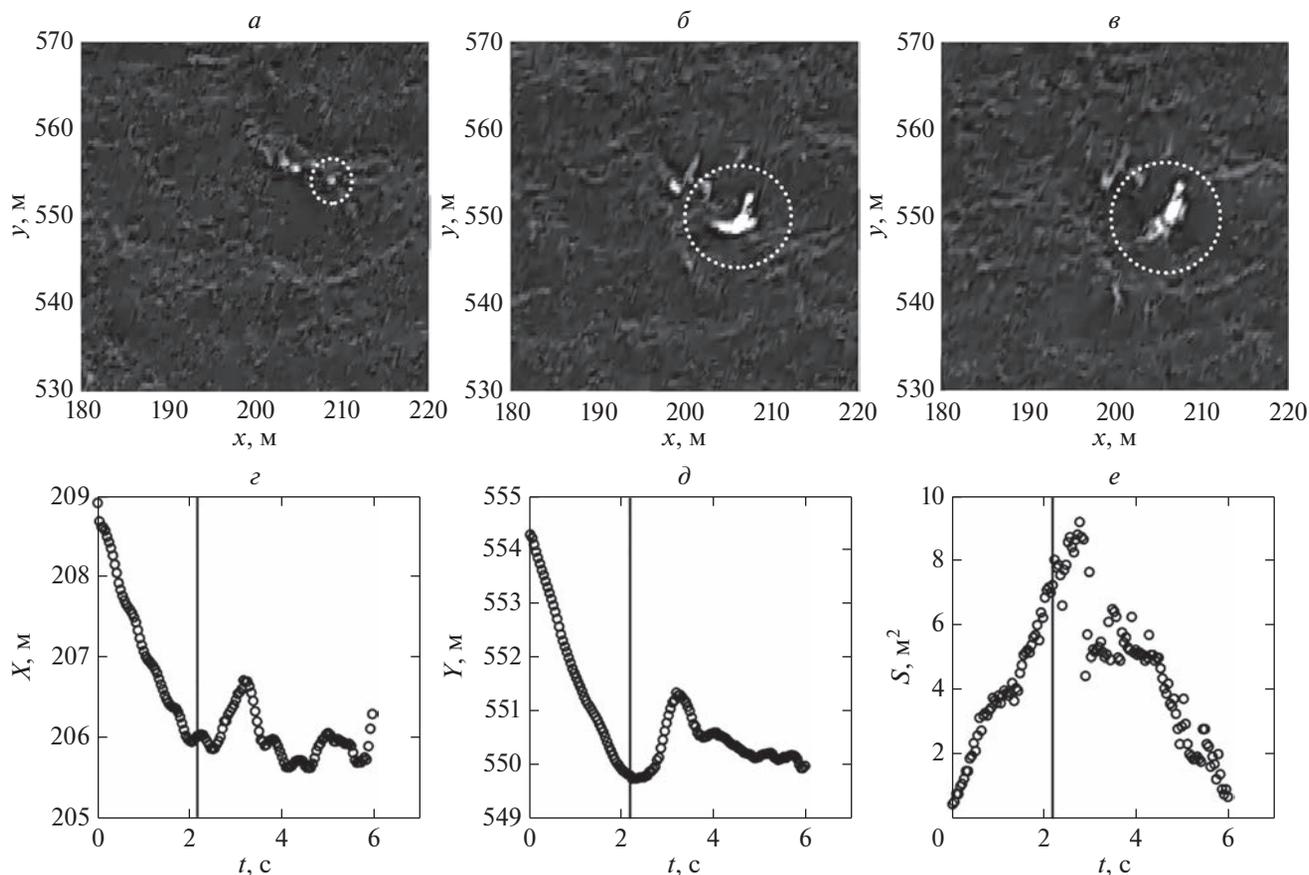


Рис. 2. Эволюция индивидуального обрушения, отмеченного кружочком: *a–в* – последовательность трансформированного на горизонтальную плоскость фрагмента кадра, в моменты времени 0 (*a*), 2.17 (*б*), 3.21 с (*в*); *з, д* – изменение во времени координат X и Y геометрического центра; *е* – зависимость площади обрушения от времени. Вертикальная прямая соответствует времени окончания прямолинейного движения барашка.

ставленных на рис.3, по мере увеличения площади обрушений происходит их слияние в единую область. Первоначально происходит объединение обрушений под номерами 2 и 3 в обрушение под номером 3 (рис. 3, *б*). Затем наблюдается слияние обрушений под номерами 1 и 3. Отметим, что объединение соседних обрушений в один барашек на видеокadre может быть вызвано как реальным их слиянием, так и связано с пространственным разрешением. Пространственное разрешение трансформированного изображения на рис. 3, *a–3, в* составляет 0.3 и 0.5 м по оси абсцисс и ординат, соответственно.

Эволюция геометрических параметров обрушения под номером 3 подробно показана на рис. 3, *з–3, е*. Моменты слияния обрушений отчетливо видны по скачкам X координаты геометрического центра и значений площади при $t = 0.125$ с и $t = 0.42$ с на рис. 3, *з, 3, е*.

Отметим, что кинематические характеристики левее прямой на рис. 3, *з–3, е* в целом соответствуют активной фазе барашка. Однако объединение небольших пенных структур в одну об-

ласть на изображении приводит к искажению определяемых характеристик отдельного обрушения, например, времени жизни, длины гребня и площади барашка.

В результате детального анализа большого массива данных об эволюции геометрических характеристик единичных пенных образований и представленных выше примеров можно сделать следующие выводы.

Одно и то же обрушение может занимать разное количество пикселей на изображениях с различным пространственным разрешением. К примеру, небольшое обрушение (линейный размер несколько дециметров) при пространственном разрешении порядка нескольких сантиметров займет десяток пикселей и отраженный от обрушения свет будут формировать полностью яркость данных пикселей. При грубом пространственном разрешении (несколько дециметров – метры) линейные размеры обрушения могут быть меньше элемента пространственного разрешения, вследствие чего яркость в пикселе, формируемая барашком, будет занижена из-за рассеяния от

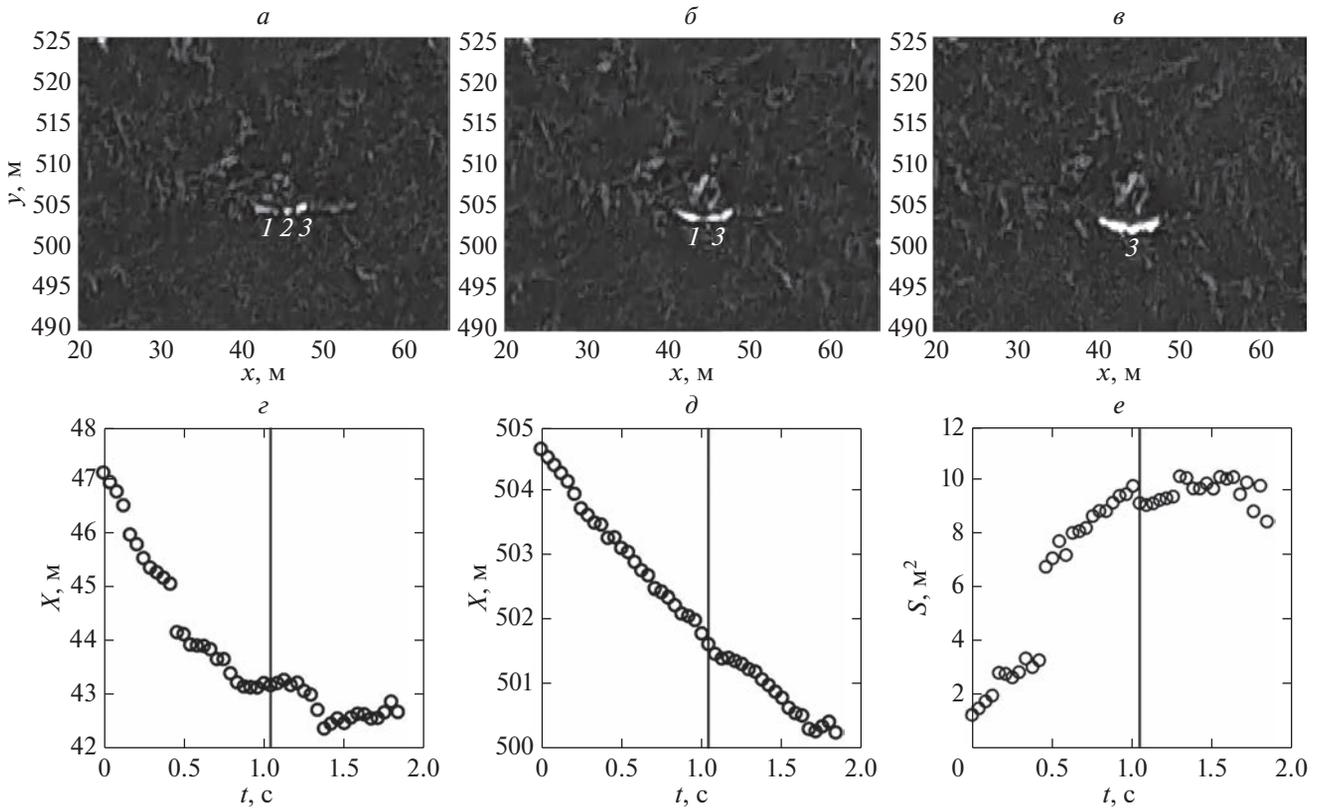


Рис. 3. Фрагменты видеокadres участка морской поверхности, трансформированные на горизонтальную плоскость, показывающие группу идентифицированных обрушений, отмеченных цифрами 1, 2, 3, и эволюцию геометрических параметров обрушения 3: *a* – для момента времени $t = 0$ с, соответствующего регистрации барашка 3, *б* – для момента времени $t = 0.17$ с, *в* – для момента времени $t = 0.58$ с; *z*, *д* – изменения во времени координат X и Y геометрического центра обрушения 3; *е* – зависимость от времени площади обрушения 3 с последующим его объединением с обрушениями 1 и 2. Вертикальная прямая отмечает окончание активного роста площади.

прилегающего участка морской поверхности. В результате яркость пенной структуры может оказаться ниже порогового уровня и соответственно не будет обнаружена при регистрации.

С другой стороны, при фактических значениях $[\Delta x, \Delta y]$, составляющих дециметры – метры, идентификация барашка происходит не в момент его зарождения, а через некоторый промежуток времени, после которого выполняется условие $I > I_0$. Это не позволяет правильно определить продолжительность активной фазы обрушения.

Как было сказано выше, окончание активной фазы обрушения сопровождается появлением остаточной пены, которая представляет собой пятнистую структуру. На изображениях с малым пространственным разрешением отдельные пятна пены будут выглядеть как сплошная яркая область. Соответственно, в этом случае, отделить активную фазу обрушения от пассивной примеси проблематично.

Как известно, доминантные волны практически не обрушиваются, однако вызывают модуляцию более коротких волн (Dulov et al., 2002; Dulov

et al., 2021). В результате происходит концентрация обрушений малых пространственных масштабов на гребне длинной волны. И если при пространственном разрешении в несколько сантиметров мы можем с достаточной точностью их различать (Dulov et al., 2021), то при малом пространственном разрешении в несколько дециметров и более, невозможно отдельно идентифицировать находящиеся рядом небольшие обрушения, максимальная длина гребня которых имеет размер несколько дециметров и менее.

Влияние пространственного разрешения на статистические характеристик обрушений

Как показано выше при малом пространственном разрешении возникают трудности с достоверным определением активной фазы обрушения, что может приводить к ошибкам при определении кинематических характеристик барашков. Нам не удалось найти работ, посвященных анализу регистрации обрушений с БПЛА, в которых рассматривается эта проблема. Рассмотрим на полученных нами данных особенности иденти-

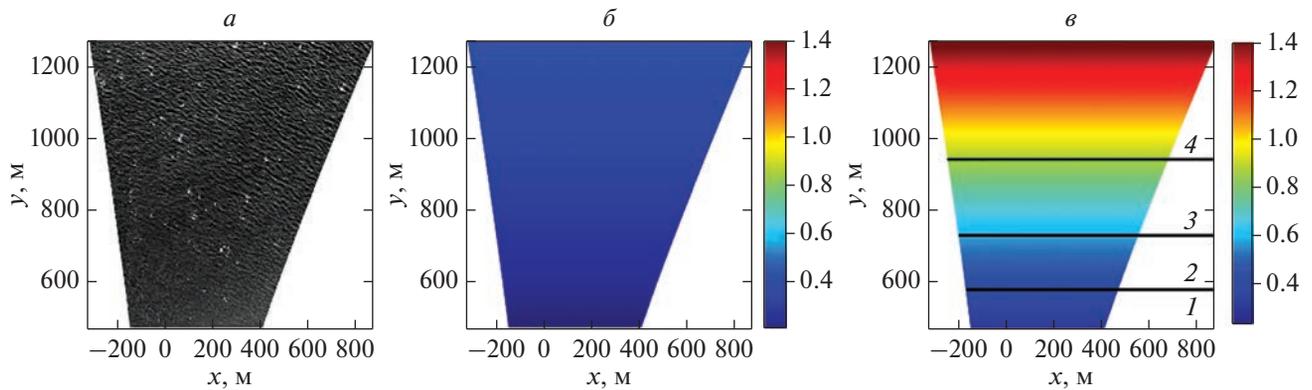


Рис. 4. Трансформированный на горизонтальную плоскость выделенный на рис. 1 фрагмент изображения: *a* – участок морской поверхности; *б* – разрешение по *x* координате; *в* – разрешение по *y* координате. Черными линиями выделяются зона 1 со средним значением $\Delta y = 0.35$ м, зона 2 с $\Delta y = 0.4$ м, зона 3 с $\Delta y = 0.65$ м, зона 4 с $\Delta y = 1.1$ м. Цветные шкалы показывают значения.

фикации обрушений при разном пространственном разрешении.

Обрушения на фоне морской поверхности идентифицировались с использованием алгоритмов (Mironov, Dulov, 2008). Выделялась лишь активная фаза обрушений, а пятна растекшейся пены, оставшейся после прохождения обрушения, автоматически отфильтровывались. Дополнительную информацию об алгоритме, см. в (Mironov, Dulov, 2008), а также в других исследованиях, где проиллюстрированы примеры эволюции геометрических характеристик барашков (см., например, рис. 3 и 4 в (Pivaev et al., 2021) и рис. 3 в (Koginenko et al., 2020)).

Для последующего анализа полученные нами в эксперименте исходные видеокadres с учетом известной геометрии наблюдений были трансформированы в прямоугольную систему горизонтальных координат, расположенную на среднем уровне моря. В качестве примера на рис. 4, *a* представлен трансформированный фрагмент видеокadra, показанный на рис. 1. Начало системы координат на рис. 4 соответствует точке пересечения нормали, проведенной вниз с БПЛА, с морской поверхности. Площадь рассматриваемого участка составляет 0.7 км^2 . Карты пространственного разрешения по координатам *x* и *y* представлены на рис. 4, *б*, 4, *в*, соответственно. Как следует из рис. 4, *б* пространственный шаг Δx между пикселями изображений вдоль вертикальной оси меняется незначительно от 0.2 до 0.4 м, в то время как величина Δy на рис. 4, *в* существенно изменяется от 0.3 до 1.4 м.

Выделим на рис. 4, *в* черными горизонтальными линиями, зоны, обозначенные цифрами 1, 2, 3, 4, в которых значения Δy соответственно меняются в пределах 0.3–0.4, 0.3–0.5, 0.5–0.8, 0.8–1.4 м. Здесь мы обозначили эти зоны исключительно

для последующей иллюстрации предварительной оценки влияния Δ на результаты определения характеристик обрушений.

Поскольку размеры рассматриваемого участка моря на рис. 4, *a* составляют 0.7 км^2 будем считать, что в его пределах метеорологические и волновые условия не изменяются. В предположении пространственной статистической однородности случайных значений характеристик обрушений, можно полагать, что возможное изменение измеряемых параметров пенных структур будет связано, в основном, с их положением на видеозображении, то есть, с различием значений в массивах Δx и Δy .

Рассмотрим влияние пространственного разрешения на статистические характеристики обрушений ветровых волн, на примере лямбда распределения $\Lambda(c)$ и распределения длин гребней обрушений $n(L)$. Согласно (Phillips, 1985), величина $\Lambda(c)dc$ представляет суммарную длину обрушивающихся гребней, движущихся со скоростями в интервале $(c, c + dc)$, на единице поверхности. Предложенная функция $\Lambda(c)$ позволяет описывать как кинематические, так и динамические свойства обрушений и является важным параметром при описании многих динамических процессов верхнего слоя моря. Интеграл $\int \Lambda(c)dc$ представляет собой полную длину обрушивающихся гребней на единице площади морской поверхности. Моменты более высокого порядка описывают динамические свойства обрушений. К примеру, потери энергии, обусловленные обрушениями, связаны с $\Lambda(c)$ выражением:

$$S_{diss}(c) = bg^{-1}c^5\Lambda(c).$$

Одномерное распределение $\Lambda(c)$ по данным наших измерений оценивалось следующим обра-

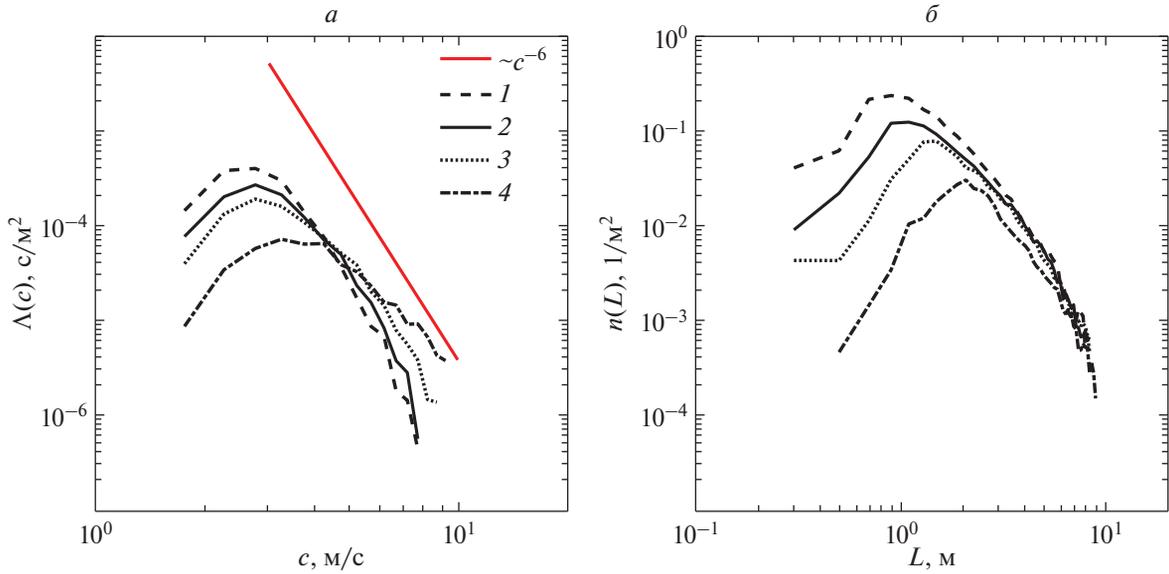


Рис. 5. Распределение статистических характеристик обрушений ветровых волн: *a* – лямбда распределение, красной линией показана зависимость $\Lambda(c) \sim c^{-6}$; *б* – гистограмма длин гребней обрушений на единице морской поверхности.

зом: $\Lambda(c) = \frac{1}{S\Delta cN} \sum_k L_k |c_k \in [c, c + \Delta c]$, где S – площадь рассматриваемого участка; Δc – интервал скорости; N – количество видеок кадров; L_k – длина k -го пенного гребня обрушивающейся волны.

На рис. 5, *a* линиями показаны $\Lambda(c)$, полученные для четырех участков трансформированного изображения. Границы этих областей отмечены горизонтальными линиями на рис. 4, *a*, *в*, а цифрами – номер зоны. Как следует из рис. 5, *a*, распределения $\Lambda(c)$ для зон 1–3 имеют ряд общих особенностей. Характерной чертой является наличие максимума $\Lambda(c)$ в окрестности $c = 3$ м/с. Для скоростей барашков, превышающих скорость, соответствующую максимуму $\Lambda(c)$, функциональная зависимость $\Lambda(c)$ от c хорошо соответствует закону $\Lambda(c) \sim c^{-6}$ (Phillips, 1985). Иная ситуация наблюдается для данных, полученных в четвертой области. Максимум функции $\Lambda(c)$ не так выражен и лежит в окрестности $c = 3.2$ – 4.5 м/с, а наклон кривой правее максимума меньше теоретической зависимости $\Lambda(c) \sim c^{-6}$. К тому же, для обрушений, движущихся со скоростями в диапазоне 1.75–3.5 м/с, значение $\Lambda(c)$ в зоне 4 на порядок меньше, чем в зоне 1. Отметим, что именно в зоне 4 наблюдается наихудший элемент пространственного разрешения.

Подобный характер наблюдается и для представленных на рис. 5, *б* гистограммах длин гребней обрушений на единице морской поверхности. Если максимумы гистограмм для 1 и 2 зон лежат в

районе $L \sim 1$ м и минимальные регистрируемые размеры длин обрушений L_{\min} составляют 0.3 м, то для зоны 4 максимум $n(L)$ лежит в окрестности $L \sim 2$ м, а L_{\min} составляют ~ 0.6 м. Количество регистрируемых обрушений на единицу поверхности с размерами 0.3–0.6 м в зоне 4 на несколько порядков меньше, чем в зонах 1 и 2.

Отметим, что представленные на рис. 5, *б* результаты в целом объясняют различия $\Lambda(c)$ в зонах 1–4. Действительно, в зонах 2–4 по отношению к зоне 1 значения максимумов $n(L)$ уменьшаются, и они смещаются в область больших L . Как отмечалось выше, яркость пенной структуры с ухудшением разрешения может лежать ниже порогового уровня, что приводит к уменьшению количества идентифицируемых барашков. В этом случае начинают идентифицироваться более длинные обрушения, статистика более мелких барашков становится необеспеченной и максимумы $n(L)$ сдвигаются вправо тем больше, чем хуже пространственное разрешение.

Поскольку лямбда функция определяется суммарной длиной гребней идентифицированных обрушений в интервале $(c, c + dc)$, то с увеличением минимальных значений регистрируемых L , имеющих большую скорость, максимумы распределений $\Lambda(c)$ для зон 2–4 также смещаются вправо.

Таким образом, регистрируемые распределения длин обрушений и $\Lambda(c)$ будут существенно зависеть от пространственного разрешения обрабатываемого видео изображения.

Представляется целесообразным сравнение характеристик обрушений, полученных в нашем эксперименте, с результатами, известными в литературе. Это позволит оценить достоверность измерений пенных структур с БПЛА при различных значениях Δ . Анализ полученных данных показал, что максимальное значение пространственного разрешения, при котором результаты наших исследований удовлетворительно согласуются с результатами других авторов, составляет 0.5 м. Ниже рассмотрим статистические характеристики обрушений, полученных для тех видеозаписей или частей кадров, где для элементов массива пространственных разрешений выполнялось условие $\Delta x \leq 0.5$ м, $\Delta y \leq 0.5$ м.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРУШЕНИЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ПО ДАННЫМ БПЛА

В данной главе рассмотрены геометрические характеристики обрушений: доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн Q , отношение длины гребня обрушения L к длине обрушающейся волны λ и распределение Филлипса $\Lambda(c)dc$. Эти величины были получены при анализе видеозаписей с БПЛА и представлены на рис. 6, на котором также приведены результаты, заимствованные из работы Korinenko et al., 2020). Отметим, что данные в (Korinenko et al., 2020) получены с помощью видеокамеры, расположенной на стационарной океанографической платформе на высоте 11.4 м над уровнем моря и пространственное разрешение составляло 0.03–0.05 м.

Доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн, один из основных индикаторов динамических процессов взаимодействия атмосферы и океана. Традиционно изменение Q в зависимости от скорости ветра описывается степенным законом, где показатель степени принимает значения ~ 2.5 – 5 (см., например, обзор в (Brumer et al., 2017; Kleiss, Melville, 2010)). На рис. 6, а представлена зависимость Q от U , где данные БПЛА представлены красными символами (○), а черные символы (●) демонстрируют результаты, заимствованные из работы (Korinenko et al., 2020). Вся группа данных на рис. 6, а хорошо аппроксимируется зависимостью $Q = 3.5 \times 10^{-4} U^{2.3}$, показанной сплошной линией (Korinenko et al., 2020), которая в свою очередь согласуется с результатами более ранних исследований (см., например, (Mironov, Dulov, 2008; Kleiss, Melville, 2010; Brumer et al., 2017)). Отметим, что данные БПЛА получены при более слабых ветрах.

Согласно идеям О. М. Филлипса (Phillips, 1989) геометрические размеры обрушений подобны и длина гребня обрушения пропорциональна длине обрушающейся волны. В работе (Korinenko

et al., 2020) показано, что плотности вероятности величин L/λ , рассчитанные для различных ветровых и волновых условий, подобны и имеют небольшой разброс. Среднее значение отношений L/λ , полученных для всех измерений, составляет 0.1.

Рассмотрим отношения длины гребня обрушения к длине обрушающейся волны $\gamma = L/\lambda$. В предположении, что скорость обрушения равна фазовой скорости обрушающейся волны, λ связана с фазовой скоростью c дисперсионным соотношением $\lambda = 2\pi g^{-1} c^2$. Для всех полученных данных рассчитывалась гистограмма $H(\gamma)$ и строилось распределение $p(\gamma) = \sum_{i=1}^m H(\gamma)/(m\Delta\gamma)$, где m и $\Delta\gamma$ – число отсчетов и интервал гистограммы соответственно. На рис. 6, б красными символами (●) показаны $p(\gamma)$ для данных настоящей работы, черная линия соответствует распределению $p(\gamma)$, заимствованному из работы (Korinenko et al., 2020). Как видно, форма распределения $p(\gamma)$ для наших измерений близка к полученной ранее в (Korinenko et al., 2020). Так же близки средние значения $\bar{\gamma} = \int \gamma p(\gamma) d\gamma$, $\bar{\gamma} = 0.1$ для данных (Korinenko et al., 2020) и $\bar{\gamma} = 0.13$ для данных настоящей работы.

На рис. 6, в красными линиями представлены $\Lambda(c)$ рассчитанные по данным БПЛА. Черные линии показывают результаты (Korinenko et al., 2020), полученные на основе видеоизмерений на океанографической платформе. Как видно из рис. 6, в, для скоростей барашков, превышающих скорость, соответствующую максимуму $\Lambda(c)$, функциональная зависимость $\Lambda(c)$ от c близка к закону $\Lambda(c) \sim c^{-6}$. Данные настоящей работы лежат ниже, представленных в (Korinenko et al., 2020). В первую очередь это связано с тем, что измерения с БПЛА проводились при более слабых ветрах, а в соответствии с (Phillips, 1989) одномерное распределение $\Lambda(c)$ имеет вид $\Lambda(c) \sim u_*^3 c^{-6}$, где u_* – скорость трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты использования БПЛА для исследования процессов обрушения гравитационных волн. Эксперименты проводились в прибрежной зоне западного Крыма (район г. Севастополь) в диапазоне скоростей ветра от 5.5 до 9.5 м/с. Определение геометрических размеров обрушений в активной фазе, скоростей их движения осуществлялось по видеозаписям морской поверхности, полученных с беспилотного летательного аппарата. Такие измерения

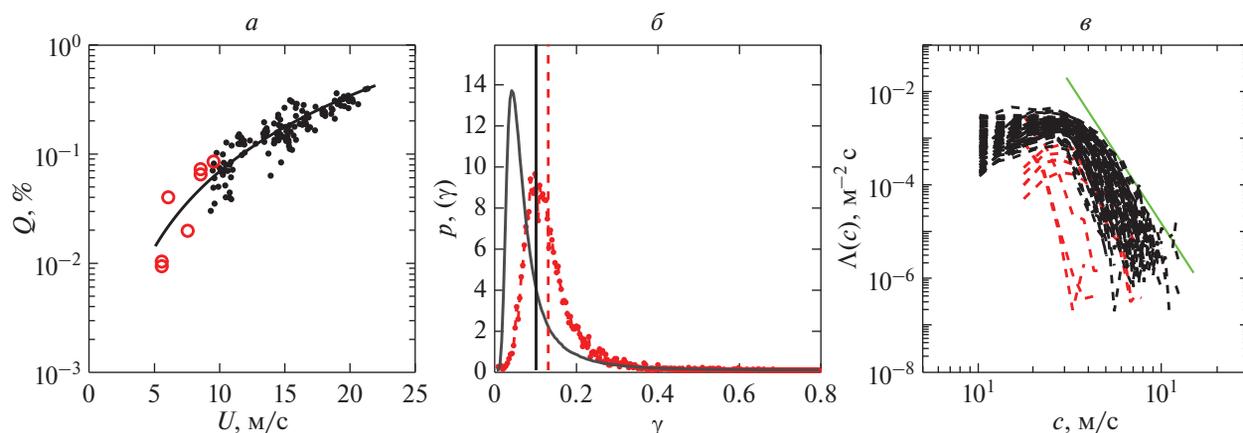


Рис. 6. Геометрические характеристики обрушений: *a* – зависимость доли морской поверхности, покрытой обрушениями, от скорости ветра; *b* – распределение отношения длины гребня обрушения к длине обрушивающейся волны, вертикальная красная штриховая линия – среднее значение $\gamma = 0.13$, черная сплошная – среднее значение, равное 0.1, полученное в работе (Кориненко и др. Korinenko et al., 2020); *c* – лямбда распределение. Зеленой линией показана зависимость $\Lambda(c) \sim c^{-6}$.

позволяют осуществлять обзор большой акватории моря, повышая статистическую обеспеченность характеристик барашков. В то же время, в зависимости от геометрии съемки (например, высоты полета, угла визирования камеры, параметров объектива), пространственное разрешение трансформированных изображений морской поверхности может существенно ухудшаться.

Как показал анализ временной эволюции единичных пенных образования, при разделении активной фазы и остаточной пены ключевую роль играет пространственное разрешение Δ видеозаписей.

Показано, что при разрешении несколько дециметров – метр, характерном при панорамных съемках моря с БПЛА, яркость обрушений с длиной гребня, занимающей часть пикселя видеокadra, может оказаться ниже порога, необходимого для идентификации барашка. В результате данное обрушение не будет идентифицировано. Активная фаза барашка и разрозненные пятна остаточной пены выглядят как единая сплошная белая область. Соответственно большую часть времени жизни регистрируемой пенной структуры может представлять ее смешанный вид, являющийся заканчивающейся активной фазой обрушения и формирующейся остаточной пеной. При недостаточном пространственном разрешении близко расположенные пятна пены будут формировать на изображении единую область, что затрудняет выделение только активной фазы обрушения. Данные эффекты приведут к искажению определяемых характеристик отдельного обрушения, например, времени жизни, длины гребня и площади барашка.

В результате обработки полученных в эксперименте данных показано, что зависимости $\Lambda(c)$, рассчитанные по участкам видеоизображений, где $\Delta \leq 0.8$ м, правее максимума удовлетворительно описываются степенным законом $\Lambda(c) \sim c^{-6}$, совпадающим с предложенным в (Phillips, 1985). При $\Delta > 0.8$ м наклон лямбда функции существенно уменьшается до $\Lambda(c) \sim c^{-4.5}$. Аналогичный характер имеют гистограммы длин гребней обрушений на единице поверхности. Если при $\Delta \leq 0.8$ м уровни гистограмм правее их максимумов практически совпадают, то для областей видеокadров с $\Delta > 0.8$ м значения $n(L)$ приблизительно в 1.5 раза меньше.

Анализ полученных данных показал, что при используемой в эксперименте видеоаппаратуре удовлетворительное соответствие наших результатов, с представленными другими авторами, достигается при пространственном разрешении лучше 0.5 м. Показано, что рассчитанная доля морской поверхности, покрытая пеной обрушающихся волн, дополняет данные (Korinenko et al., 2020) и хорошо согласуется с зависимостью $Q = 3.5 \times 10^{-4} U^{2.3}$. Полученная нами плотность вероятности отношения длины гребня барашка к длине обрушивающейся волны и среднее значение $\bar{\gamma} = 0.13$ близки к $p(\gamma)$, и величине $\bar{\gamma} = 0.1$, представленным в (Korinenko et al., 2020). Сопоставление зависимостей с результатами (Korinenko et al., 2020) показало, что, наши данные, как и у других авторов близки к закону

Полученные результаты показывают, что использование беспилотных летательных аппаратов позволяет исследовать статистические характе-

ристики и кинематику обрушений ветровых волн. В то же время, необходимо учитывать влияние пространственного разрешения в видеокадре, которое при значениях, сопоставимых или превышающих масштаб обрушения может приводить к искажению или пропуску данных измерений.

Работа выполнена в рамках государственных заданий FNNN-2021-0004 и 0763-2020-0005, натурные данные получены по проекту Российского научного фонда № 21-17-00236, <https://rscf.ru/project/21-17-00236/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики пенных образований на взволнованной морской поверхности // *Океанология*. 1982. Т. 22. № 3. С. 372–379.
- Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики элементов линейной геометрии пенных структур на поверхности моря по данным оптического зондирования // *Исслед. Земли из космоса*. 1986. № 4. С. 21–31.
- Бортковский Р.С.* К оценке среднего обмена кислородом и CO₂ между океаном и атмосферой в ключевых районах океана // *Изв. РАН. ФАО*. 2006. Т. 42. № 2. С. 250–257.
- Шарков Е.А.* Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика. М.: Научный мир, 2009. 304 с.
- Anguelova M.D., Bettenhausen M.H.* Whitecap fraction from satellite measurements: Algorithm description // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019 V. 124. Iss. 3. P. 1827–1857. <https://doi.org/10.1029/2018JC014630>
- Anguelova M.D., Webster F.* Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2006. V. 111 Iss. C03017. P. 1–23. <https://doi.org/10.1029/2005JC003158>
- Babanin A.V.* Breaking of ocean surface waves // *Acta Phys. Slovaca*. 2009. V. 59. № 4. P. 305–535. <https://doi.org/10.2478/v10155-010-0097-5>
- Bouguet J.Y.* Camera calibration toolbox for MATLAB, Computational Vision Group, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 2001.
- Brouwer R.L., de Schipper M.A., Rynne P.F., Graham F.J., Reniers A.J. H.M., MacMahan J.H.* Surfzone Monitoring Using Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicles // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2015. V. 32. Iss. 4. P. 855–863. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-14-00122.1>
- Brumer S.E., Zappa C.J., Brooks I.M., Tamura H., Brown S.M., Blomquist B.W.* Cifuentes-Lorenzen, A. Whitecap coverage dependence on wind and wave statistics as observed during SO GasEx and HiWinGS // *J. Physical Oceanography*. 2017. V. 47. Iss. 9. P. 2211–2235. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0005.1>
- Callaghan A.H., Deane G.B., Stokes M.D., Ward B.* Observed variation in the decay time of oceanic whitecap foam // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2012. V. 117. Iss. C9. <https://doi.org/10.1029/2012JC008147>
- Dulov V.A., Korinenko A.E., Kudryavtsev V.N., Malinovsky V.V.* Modulation of Wind-Wave Breaking by Long Surface Waves // *Remote Sens*. 2021. V. 13. № 14. 2825. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs13142825>
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N.* A field study of white caps coverage and its modulations by energy containing waves // *In Gas Transfer at Water Surface. Geophys. Monogr. / Ed. Donelan M.A., Drennan W.M., Saltzman E.S., Wanninkhof R.* AGU: Washington DC. USA, 2002. P. 187–192.
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Sherbak O.G., Grodsky S.A.* Observations of Wind Wave Breaking in the Gulf Stream Frontal Zone // *Glob. Atmos. Ocean. Syst.* 1998. V. 6. № 3. P. 209–242.
- Gemmrich J.R., Banner M.L., Garrett C.* Spectrally resolved energy dissipation rate and momentum flux of breaking waves // *J. Physical Oceanography*. 2008. V. 8. Iss. 6. P. 1296–1312. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3762.1>
- Holman R.A., Brodie K.L., Spore N.J.* Surf Zone Characterization Using a Small Quadcopter: Technical Issues and Procedures // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 55. Iss. 4. P. 2017–2027. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2635120>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas // *J. Physical Oceanography*. 2010. V. 40. Iss. 12. P. 2575–2604. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4383.1>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* The analysis of sea surface imagery for whitecap kinematics // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011. V. 28. Iss. 2. P. 219–243. <https://doi.org/10.1175/2010JTECH0744.1>
- Klemas V.V.* Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. // *J. Coastal Research*. 2015. V. 31. № 5. P. 1260–1267. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N.* Experimental Research of Statistical Characteristics of Wind Wave Breaking // *Physical Oceanography*. 2018. V. 25. Iss. 6. P. 489–500. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-6-489-50>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N., Dulov V.A.* Statistical Characteristics of Wave Breakings and their Relation with the Wind Waves' Energy Dissipation Based on the Field Measurements. // *Physical Oceanography*. 2020. V. 27. Iss. 5. P. 472–488. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-472-488>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Dulov V.A., Kudryavtsev V.N.* Estimation of the “Whitecap” Lifetime of Breaking Wave // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. V. 15. № 1. P. 61–72. <https://doi.org/10.48612/fpg/5g5t-4mzd-94ab>
- Kubryakov A.A., Kudryavtsev V.N., Stanichny S.V.* Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking // *Remote Sens. Environ.* 2021. V. 253. P. 112144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112144>
- Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Chepyzhenko A.I., Aleskerova A.A., Kubryakova E.A., Medvedeva A.V., Stanichny S.V.* Impact of Submesoscale Eddies on the Transport of Suspended Matter in the Coastal Zone of Crimea Based on Drone, Satellite, and In Situ Measurement Data // *Ocean-*

- ology. 2021. V. 61. № 2. P. 159–172.
<https://doi.org/10.1134/S0001437021020107>
- Kudryavtsev V.N., Dulov V.A., Shrira V., Malinovsky V.V.* On vertical structure of wind-driven sea surface currents. // *J. Phys. Oceanogr.* 2008. V. 38. Iss. 10. P. 2121–2144.
<https://doi.org/10.1175/2008JPO3883.1>
- Melville W.K., Matusov P.* Distribution of breaking waves at the ocean surface // *Nature.* 2002. V. 417. Iss. 6884. P. 58–63.
<https://doi.org/10.1038/417058a>
- Mironov A.S., Dulov V.A.* Detection of wave breaking using sea surface video records // *Measurement Science and Technology.* 2008. V. 19. № 1. 015405.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015405>
- Monahan E.C., O’Muircheartaigh I.G.* Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface. // *Int. J. Remote Sens.* 1986. V. 7. Iss. 5. P. 627–642.
<https://doi.org/10.1080/01431168608954716>
- Osadchiv A., Barytova A., Sedakov R., Zhiba R., Dbar, R.* Spatial structure, short-temporal variability, and dynamical features of small river plumes as observed by aerial drones: Case study of the Kodor and Bzyp river plumes // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. № 18. 3079. P. 1–30
<https://doi.org/10.3390/rs12183079>
- Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *J. Fluid Mech.* 1985. V. 156. P. 505–531.
<https://doi.org/10.1017/S0022112085002221>
- Phillips O.M., Posner F.L., Hansen J.P.* High range resolution radar measurements of the speed distribution of breaking events in wind-generated ocean waves: Surface impulse and wave energy dissipation rates // *J. Physical Oceanography.* 2001. V. 31. Iss. 2. P. 450–460.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2)
- Pivaev P.D., Kudryavtsev V.N., Korinenko A.E., Malinovsky V.V.* Field Observations of Breaking of Dominant Surface Waves // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 16. 3321.
<https://doi.org/10.3390/rs13163321>
- Schwendeman M., Thomson J., Gemmrich J.R.* Wave breaking dissipation in a young wind sea // *J. Physical Oceanography.* 2014. V. 44. Iss. 1. P. 104–127.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0237.1>
- Sutherland P., Melville W.K.* Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // *Geophysical Research Letters.* 2013. V. 40. Iss. 12. P. 3074–3079.
<https://doi.org/10.1002/grl.50584>
- Sutherland P., Melville W.K.* Field Measurements of Surface and Near-Surface Turbulence in the Presence of Breaking Waves // *J. Physical Oceanography.* 2015. V. 45. Iss. 4. P. 943–965.
<https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0133.1>
- Thorpe S.A., Belloul M.B., Hall A.J.* Internal waves and whitecaps // *Nature.* 1987. V. 330. P. 740–742.
<https://doi.org/10.1038/330740a0>
- Thorpe S.A., Hall A.J.* The characteristics of breaking waves, bubble clouds, and near-surface currents observed using side-scan sonar // *Continental Shelf Research.* 1983. V. 1. № 4. P. 353–384.
[https://doi.org/10.1016/0278-4343\(83\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0278-4343(83)90003-1)
- Wu L., Rutgersson A., Sahl’ee E.* Upper-ocean mixing due to surface gravity waves // *J. Geophysical Research: Oceans.* 2015. V. 120. Iss. 12. P. 8210–8228.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011329>
- Yurovskaya M., Rascle N., Kudryavtsev V., Chapron B., Marié L., Molemaker J.* Wave spectrum retrieval from airborne sunlitter images // *Remote sensing of Environment.* 2018. V. 217 P. 61–71.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.026>
- Yurovsky Y.Y., Kubryakov A.A., Plotnikov E.V., Lishaev P.N.* Submesoscale Currents from UAV: An Experiment over Small-Scale Eddies in the Coastal Black Sea // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. № 14. 3364. P. 1–18.
<https://doi.org/10.3390/rs14143364>

Registration Peculiarities of Wind Waves Breaking From Unmanned Aerial Vehicles

A. E. Korinenko^{1,2}, V. V. Malinovsky^{1,2}, and A. A. Kubryakov¹

¹*Marine Hydrophysical Institute of Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

²*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

The results of using an unmanned aerial vehicle (UAV) to study the processes of gravitational wave breaking are presented. The experiments were carried out in the coastal zone of the western Crimea (the area of Sevastopol) in the range of wind speeds from 5.5 to 9.5 m/s. The determination of the geometric dimensions of breaking and their speeds was carried out according to video recordings of sea surface obtained from the UAV. It is shown that the spatial resolution of the transformed image plays a key role in separating the active phase of breaking and residual foam. Errors occur in determining the kinematic properties of the breaking with a rough spatial resolution. The proportion of the sea surface covered with foam of breaking waves, the ratio of the maximum length of the spume to the length of the breaking wave, the distribution of the total breaking length in the intervals of movement speeds per surface unit (obtained from UAVs with a spatial resolution better than 0.5 m) are in agreement with results of other authors. Data analysis shows that the use of unmanned aerial vehicles makes it possible to study the statistical characteristics and kinematics of wind wave breaking. At the same time, it is necessary to take into account the effect of spatial resolution in the video frame, which can lead to distortion or omission of measurement data at values comparable to or exceeding the breaking scale.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs), remote sensing of the ocean, gravitational wave breaking, kinematic properties of breaking waves, portion of the sea surface covered with breaking foam

REFERENCES

- Anguelova M.D., Bettenhausen M.H.* Whitecap fraction from satellite measurements: Algorithm description // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. Iss. 3. P. 1827–1857.
<https://doi.org/10.1029/2018JC014630>
- Anguelova M.D., Webster F.* Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2006. V. 111. Iss. C03017. P. 1–23.
<https://doi.org/10.1029/2005JC003158>
- Babanin A.V.* Breaking of ocean surface waves // *Acta Phys. Slovaca*. 2009. V. 59. № 4. P. 305–535.
<https://doi.org/10.2478/v10155-010-0097-5>
- Bondur V.G., Sharkov E.A.* Statisticheskie karakteristiki elementov linejnoy geometrii pennyh struktur na poverhnosti morya po dannym opticheskogo zondirovaniya [Statistical characteristics of linear elements of foam formations on the sea-surface as derived from optical sounding data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 1986. № 4. P. 21–31. (In Russian).
- Bondur V.G., Sharkov E.A.* Statistical properties of whitecaps on a rough sea // *Oceanology*. 1982. V. 22. № 3. P. 274–279.
- Bortkovskii R.S.* K ocenke srednego obmena kislorodom i SO₂ mezhdou okeanom i atmosferoj v klyuchevyh rajonah okeana [To estimate the average exchange of oxygen and CO₂ between the ocean and the atmosphere in key areas of the ocean] // *Izvestiya RAS. FAO*. 2006. V. 42. № 2. P. 250–257. (In Russian).
- Bouguet J.Y.* Camera calibration toolbox for MATLAB, Computational Vision Group, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 2001.
- Brouwer R.L., de Schipper M.A., Rynne P.F., Graham F.J., Reniers A.J. H.M., MacMahan J.H.* Surfzone Monitoring Using Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicles // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2015. V. 32. Iss. 4. P. 855–863.
<https://doi.org/10.1175/jtech-d-14-00122.1>
- Brumer S.E., Zappa C.J., Brooks I.M., Tamura H., Brown S.M., Blomquist B.W.* Cifuentes-Lorenzen, A. Whitecap coverage dependence on wind and wave statistics as observed during SO GasEx and HiWinGS // *J. Physical Oceanography*. 2017. V. 47. Iss. 9. P. 2211–2235.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0005.1>
- Callaghan A.H., Deane G.B., Stokes M.D., Ward B.* Observed variation in the decay time of oceanic whitecap foam // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2012. V. 117. Iss. C9.
<https://doi.org/10.1029/2012JC008147>
- Dulov V.A., Korinenko A.E., Kudryavtsev V.N., Malinovsky V.V.* Modulation of Wind-Wave Breaking by Long Surface Waves // *Remote Sens*. 2021. V. 13. № 14. 2825. P. 1–15.
<https://doi.org/10.3390/rs13142825>
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N.* A field study of white caps coverage and its modulations by energy containing waves // *In Gas Transfer at Water Surface*. Geophys. Monogr. / Ed. Donelan M.A., Drennan W.M., Saltzman E.S., Wanninkhof R. AGU: Washington DC. USA, 2002. P. 187–192.
- Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Sherbak O.G., Grodsky S.A.* Observations of Wind Wave Breaking in the Gulf Stream Frontal Zone // *Glob. Atmos. Ocean. Syst.* 1998. V. 6. № 3. P. 209–242.
- Gemrich J.R., Banner M.L., Garrett C.* Spectrally resolved energy dissipation rate and momentum flux of breaking waves // *J. Physical Oceanography*. 2008. V. 8. Iss. 6. P. 1296–1312.
<https://doi.org/10.1175/2007JPO3762.1>
- Holman R.A., Brodie K.L., Spore N.J.* Surf Zone Characterization Using a Small Quadcopter: Technical Issues and Procedures // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. V. 55. Iss. 4. P. 2017–2027.
<https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2635120>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* Observations of wave breaking kinematics in fetch-limited seas // *J. Physical Oceanography*. 2010. V. 40. Iss. 12. P. 2575–2604.
<https://doi.org/10.1175/2010JPO4383.1>
- Kleiss J.M., Melville W.K.* The analysis of sea surface imagery for whitecap kinematics // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2011. V. 28. Iss. 2. P. 219–243.
<https://doi.org/10.1175/2010JTECHO744.1>
- Klemas V.V.* Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview. // *J. Coastal Research*. 2015. V. 31. № 5. P. 1260–1267.
<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Dulov V.A., Kudryavtsev V.N.* Estimation of the “Whitecap” Lifetime of Breaking Wave // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. V. 15. № 1. P. 61–72.
<https://doi.org/10.48612/fpg/5g5t-4mzd-94ab>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N.* Experimental Research of Statistical Characteristics of Wind Wave Breaking // *Physical Oceanography*. 2018. V. 25. Iss. 6. P. 489–500.
<https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-6-489-50>
- Korinenko A.E., Malinovsky V.V., Kudryavtsev V.N., Dulov V.A.* Statistical Characteristics of Wave Breakings and their Relation with the Wind Waves’ Energy Dissipation Based on the Field Measurements // *Physical Oceanography*. 2020. V. 27. Iss. 5. P. 472–488.
<https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-472-488>
- Kubryakov A.A., Kudryavtsev V.N., Stanichny S.V.* Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking // *Remote Sens. Environ.* 2021. V. 253. P. 112144.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112144>
- Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Chepyzhenko A.I., Aleskerova A.A., Kubryakova E.A., Medvedeva A.V., Stanichny S.V.* Impact of Submesoscale Eddies on the Transport of Suspended Matter in the Coastal Zone of Crimea Based on Drone, Satellite, and In Situ Measurement Data // *Oceanology*. 2021. V. 61. № 2. P. 159–172.
<https://doi.org/10.1134/S0001437021020107>
- Kudryavtsev V.N., Dulov V.A., Shkira V., Malinovsky V.V.* On vertical structure of wind-driven sea surface currents. // *J. Phys. Oceanogr.* 2008. V. 38. Iss. 10. P. 2121–2144.
<https://doi.org/10.1175/2008JPO3883.1>
- Melville W.K., Matusov P.* Distribution of breaking waves at the ocean surface // *Nature*. 2002. V. 417. Iss. 6884. P. 58–63.
<https://doi.org/10.1038/417058a>
- Mironov A.S., Dulov V.A.* Detection of wave breaking using sea surface video records // *Measurement Science and Technology*. 2008. V. 19. № 1. 015405.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015405>

- Monahan E.C., O'Muircheartaigh I.G.* Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface // *Int. J. Remote Sens.* 1986. V. 7. Iss. 5. P. 627–642.
<https://doi.org/10.1080/01431168608954716>
- Osadchiev A., Barymova A., Sedakov R., Zhiba R., Dbar R.* Spatial structure, short-temporal variability, and dynamical features of small river plumes as observed by aerial drones: Case study of the Kodor and Bzyp river plumes // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. № 18. 3079. P. 1–30.
<https://doi.org/10.3390/rs12183079>
- Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *J. Fluid Mech.* 1985. V. 156. P. 505–531.
<https://doi.org/10.1017/S0022112085002221>
- Phillips O.M., Posner F.L., Hansen J.P.* High range resolution radar measurements of the speed distribution of breaking events in wind-generated ocean waves: Surface impulse and wave energy dissipation rates // *J. Physical Oceanography.* 2001. V. 31. Iss. 2. P. 450–460.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0450:HRR-RMO>2.0.CO;2)
- Pivaev P.D., Kudryavtsev V.N., Korinenko A.E., Malinovsky V.V.* Field Observations of Breaking of Dominant Surface Waves // *Remote Sens.* 2021. V. 13. № 16. 3321.
<https://doi.org/10.3390/rs13163321>
- Schwendeman M., Thomson J., Gemmrich J.R.* Wave breaking dissipation in a young wind sea // *J. Physical Oceanography.* 2014. V. 44. Iss. 1. P. 104–127.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0237.1>
- Sharkov E.A.* Obrushayushchiesya morskije volny: struktura, geometriya, elektrodinamika [Breaking seawaves: structure, geometry, electrodynamics] M.: Scientific World, 2009. 304 p. (In Russian).
- Sutherland P., Melville W.K.* Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // *Geophysical Research Letters.* 2013. V. 40. Iss. 12. P. 3074–3079.
<https://doi.org/10.1002/grl.50584>
- Sutherland P., Melville W.K.* Field Measurements of Surface and Near-Surface Turbulence in the Presence of Breaking Waves // *J. Physical Oceanography.* 2015. V. 45. Iss. 4. P. 943–965.
<https://doi.org/10.1175/jpo-d-14-0133.1>
- Thorpe S.A., Belloul M.B., Hall A.J.* Internal waves and whitecaps // *Nature.* 1987. V. 330. P. 740–742.
<https://doi.org/10.1038/330740a0>
- Thorpe S.A., Hall A.J.* The characteristics of breaking waves, bubble clouds, and near-surface currents observed using side-scan sonar // *Continental Shelf Research.* 1983. V. 1. № 4. P. 353–384.
[https://doi.org/10.1016/0278-4343\(83\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0278-4343(83)90003-1)
- Wu L., Rutgersson A., Sahl'ee E.* Upper-ocean mixing due to surface gravity waves // *J. Geophysical Research: Oceans.* 2015. V. 120. Iss. 12. P. 8210–8228.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011329>
- Yurovskaya M., Rasle N., Kudryavtsev V., Chapron B., Marié L., Molemaker J.* Wave spectrum retrieval from airborne sunglitter images // *Remote sensing of Environment.* 2018. V. 217 P. 61–71.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.026>
- Yurovsky Y.Y., Kubryakov A.A., Plotnikov E.V., Lishaev P.N.* Submesoscale Currents from UAV: An Experiment over Small-Scale Eddies in the Coastal Black Sea // *Remote Sensing.* 2022. V. 14. № 14. 3364. P. 1–18.
<https://doi.org/10.3390/rs14143364>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОЦЕНКА ИНДЕКСА NDVI КАК ИСТОЧНИКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЕ В СТЕПЯХ

© 2023 г. А. В. Хорошев^а, * О. Г. Калмыкова^б, Г. Х. Дусаева^б

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^бИнститут степи УрО РАН, Оренбург, Россия

*E-mail: avkh1970@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.09.2022 г.

Трудоемкость измерений фитомассы на пробных площадках сдерживает экстраполяцию точечных данных на территории, сопоставимые с хозяйственными угодьями или ландшафтными единицами. Вегетационные индексы, рассчитываемые по космическим снимкам, обычно рассматриваются как индикаторы зеленой фитомассы и используются для ее площадных оценок. В исследовании решается задача установить информативность нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI в зависимости от фракционной структуры живой и мертвой надземной фитомассы, сезонной динамики биологического круговорота, гидротермических условий и ландшафтной позиции. Используются результаты ежемесячных измерений фракций надземной фитомассы на 13 площадках в фитоценозах залесскоковылной и ковылковой формаций в Буртинской степи (заповедник “Оренбургский”) с мая по сентябрь в 2015–2020 гг. Для каждого срока по космическим снимкам Landsat рассчитаны значения NDVI на всех площадках. Гипотезы о геоботанических, гидротермических, фенологических и ландшафтных факторах информативности NDVI проверялись расчетом коэффициентов корреляции Спирмена, средствами дисперсионного и мультирегрессионного анализа. Несоответствие сезонных пиков NDVI и зеленой фитомассы не согласуется с распространенным представлением о прямом индикационном значении NDVI. Общая живая фитомасса более четко коррелирует с индексом в июне и июле, слабее – в конце сезона. NDVI оказался чувствительным не столько к запасам зеленой фитомассы как таковой, сколько к массе и доле разнотравья и соотношению живой и мертвой фитомассы. В поздневесеннее и раннелетнее время NDVI наиболее тесно связан с разнотравьем, в июле – со злаками. Подтвердилась гипотеза о возможности экранирования зеленой массы ветошью, что приводит к снижению NDVI несмотря на сохранение или рост зеленой фитомассы. NDVI может занижать реальную зеленую фитомассу, если происходит резкий прирост массы ветоши, обычно – во второй половине лета и начале осени. NDVI более адекватно отражает состояние надземной фитомассы степных сообществ, длительное время не подвергавшихся воздействию пожаров, по сравнению с горевшими сообществами и залежами.

Ключевые слова: NDVI, Буртинская степь, фракции фитомассы, разнотравье, ветошь, сезонная динамика, залежь, гарь

DOI: 10.31857/S020596142303003X, **EDN:** TYJJZE

ВВЕДЕНИЕ

Динамические ряды измерений фитомассы, особенно ее фракционного состава, относятся к числу наиболее трудоемких видов исследования функционирования ландшафтов (Базилевич и др., 1978; Титлянова и др., 2018). В то же время потребность в данных о фитомассе велика. Во-первых, это связано с ее ресурсным значением (урожайность сельскохозяйственных культур, качество пастбищ, запасы трав на сенокосах, запасы древесины и др.). Во-вторых, фитомасса – надежный индикатор экологических условий и их антропогенных трансформаций. В-третьих, она выступает как индикатор защищенности ландшафта от экзодинамических процессов (эрозии,

дефляции, селей, термокарста и др.) и нарушений режима стока. Сезонная и многолетняя динамика фитомассы и ее составляющих важна для оценки устойчивости экосистем как способности выдерживать тот или иной диапазон естественных и антропогенных колебаний среды. Трудоемкость измерений фитомассы на немногочисленных пробных площадках и невозможность охватить все составляющие ландшафтного разнообразия сдерживают получение оценок параметров функционирования, которые позволяли бы экстраполировать точечные результаты на территории, сопоставимые с хозяйственными угодьями или ландшафтными единицами.

В последние два–три десятилетия острота этой проблемы, казалось бы, сглаживается благодаря доступности многоканальной космической информации и появлению разнообразных индексов состояния компонентов ландшафтов. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) довольно давно трактуется как индикатор зеленой надземной фитомассы, отражающий интенсивность фотосинтеза. Связь NDVI с реальной надземной фитомассой чаще всего исследуется при выявлении факторов варьирования урожайности сельскохозяйственных культур (Nagy et al., 2018), в частности – причин внутривидового варьирования (Verhulst, Govaerts, 2010; Гулянов, 2019). Одной из традиционных областей применения NDVI стали исследования межгодового варьирования значений NDVI и связи с климатическими флуктуациями и трендами (de Jong et al., 2012; Елсаков, Телятников, 2013; Курганович, Голытина, 2015; Han et al., 2019), изменениями землепользования (Peng et al., 2019). Установлена пространственная нестационарность отношений между NDVI и климатическими факторами (Gao et al., 2012; Zhao et al., 2015).

В то же время накопление литературных данных свидетельствует о неоднозначности трактовки этого индекса. Описано немало ограничений на прямолинейную интерпретацию и уточнений для разных географических условий. Так, высокая корреляция NDVI с зеленой массой получена для засушливых районов (Золотокрылин и др., 2020). Для лесов результаты противоречивы: для разных регионов получены как сильные связи (Елсаков, 2012), так и слабые (Залиханов и др., 2010). Получены данные о неравноценной информативности индекса в разные сезоны (Lyle et al., 2013), при экстремальных погодных условиях (Piao et al., 2014; Nagy et al., 2018). Установлена высокая чувствительность NDVI к экологическим характеристикам местообитания – почвам, влажности, рельефу (Gamon et al., 2013; Araya et al., 2017; Maunard, Levi, 2017; Piedallu et al., 2019; Гопп и др., 2016). Обращается внимание на неоднозначные соответствия между NDVI и фитомассой, связанные с большим количеством одревесневающих и усыхающих стеблей (Лиджиева и др., 2012), временной изменчивостью аспектов посевов (Жуков и др., 2013), различной архитектоникой доминантных видов растений по сезонам (Ерошенко и др., 2018), “насыщением” при высокой густоте растительного покрова (Савин и др., 2015), несовпадением сезонных максимумов NDVI и продуктивности (Рулев и др., 2016). В работе В.В. Михайлова с соавторами (2021) для тундровых сообществ средствами регрессионного моделирования выполнен переход от безразмерных показателей NDVI к метрическим величинам хлорофиллового индекса, по которому оценена масса автотрофных органов растений и определе-

на фитомасса сообщества с учетом особенностей ее накопления и распределения в растениях. В связи с этим становится ясной необходимость и обратной задачи: строгой верификации NDVI по наземным измерениям фракций надземной фитомассы – живой и мертвой и связанной с разными агробиологическими группами растений.

В нашем исследовании поставлена задача установить зависимость NDVI от фракционной структуры живой и мертвой надземной фитомассы, сезонной динамики биологического круговорота, гидротермических условий года и ландшафтной позиции на основании многолетних сезонных измерений в заповедном степном ландшафте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве модельной территории для проведения исследований был выбран участок Буртинская степь заповедника “Оренбургский” и его охранный зона. В ботанико-географическом отношении этот заповедный кластер расположен в подзоне разнотравно-дерновиннозлаковых Заволжско-Казахстанских степей (Сафронова, Калмыкова, 2012), в почвенно-географическом – в подзоне черноземов южных (Красная книга почв ..., 2001).

На территории Буртинской степи было заложено 6 стационарных мониторинговых степных участков в разных экологических условиях (Дусаева и др., 2016; МаксUTOва и др., 2016; Дусаева, МаксUTOва, 2017; Dusaeva et al., 2019). Растительные сообщества на участках относились к различным группам ассоциаций двух формаций – *Stipeta zalesskii* и *Stipeta lessingiana*, – сообщества которых наиболее распространены (Калмыкова, 2012) на исследуемом заповедном кластере). Участки № 1 и 4 в наибольшей степени пострадали от перевыпаса в дозаповедный период, а участок № 5, расположенный в охранный зоне заповедника – старовозрастная залежь. В пределах участков выбирались пары мониторинговых площадей, разделенные границей гари 2014 г. (горевшая (А), негоревшая (Б)), где ежегодно проводились геоботанические описания и укусы надземной фитомассы (Дусаева и др., 2020).

Геоботанические описания выполнялись с использованием стандартных геоботанических методик (Полевая геоботаника, 1964, Ярошенко, 1961, Работнов, 1992). Учет надземной фитомассы проводился методом укусных площадей (Базилевич, Титлянова и др., 1978) в середине месяца с мая по сентябрь с 2015 г. Растения срезались вровень с почвой, на площадках по 0.25 м² в 3-кратной повторности. Полученные образцы высушивались до воздушно сухой массы. Отбор ветоши в каждой группе и взвешивание образцов осуществлялись в лабораторных условиях. Подстилку

отбирали вручную на укосных площадках, после того как с них срезали растения. Пробы очищаются от почвы до и после высушивания.

Расчет NDVI для территориальных единиц, соответствовавших по географическим координатам площадкам опробования, проводился по безоблачным космическим снимкам Landsat с разрешением 30 м за сроки, соответствовавшие датам полевых определений наземной фитомассы. Из 25 сроков измерений фитомассы в 2015–2018 и 2020 гг. космическими снимками и расчетами NDVI обеспечено 16, в том числе 3 – для мая, 3 – для июня, 3 – для июля, 4 – для августа, 3 – для сентября.

На основании имеющихся данных средствами программы Statistica 7.0 методами корреляционного и дисперсионного анализа проверялась серия гипотез о геоботанических, гидротермических, фенологических и ландшафтных факторах, определяющих информативность NDVI как индикатора зеленой фитомассы.

Гипотеза 1: агробиологические группы растений вносят неодинаковый вклад в пространственное и временно варьирующее NDVI. Инструментом проверки гипотезы был расчет непараметрических коэффициентов корреляции Спирмена между NDVI за каждый срок и фитомассой групп растений – злаков, разнотравья, осок, бобовых, полукустарничков и кустарничков.

Гипотеза 2: теснота связи и вид зависимости между NDVI и фитомассой определяется фазой развития сообщества в годовом цикле. Сравнивались модуль и знак коэффициентов корреляции Спирмена для разных месяцев независимо от конкретного года. Делалось допущение, что пространственное варьирующее показателей фитомассы и NDVI в конкретный месяц не зависит от гидротермических условий года.

Гипотеза 3: теснота связи и вид зависимости между NDVI и фитомассой может меняться в зависимости от гидротермических условий года. Ход температур и осадков в течение вегетационного периода с мая по сентябрь, различающийся от года к году, может определять характер связи исследуемых показателей. Сравнивались корреляции, полученные отдельно по годам (2015, 2016, 2017, 2018, 2020) независимо от месяца измерения. Проверялось предположение, что теснота связи, т.е. правило сопряженного пространственного варьирующего фитомассы и NDVI, возрастает в годы с некоторым специфической комбинацией тепло- и влагообеспеченности.

Гипотеза 4: теснота связи и вид зависимости между NDVI и фитомассой специфичны для сообщества независимо от сезонной фазы его развития и гидротермических условий года, но определяются “историей” сообщества, т.е. былыми (до установления заповедного режима) способами

землепользования и длительностью послепожарной сукцессии. Сравнивались корреляции для отдельных площадок независимо от года и месяца наблюдений с предположением, что варьирование фитомассы и NDVI во времени подчиняется единому правилу независимо от ландшафтной позиции.

Гипотеза 5: теснота связи и вид зависимости между NDVI и фитомассой в каждый момент времени определяются различиями ландшафтной позиции сообществ, сходных по видовому составу, а именно – приуроченностью к выпуклой или плоской мезоформе рельефа, принадлежностью к возвышенной (структурно-эрозионной) или низкой (долинно-балочной) местности, характером почвообразующих пород и гранулометрическим составом почв. Сравнивались корреляции для разных сроков наблюдения с предположением, что пространственное варьирование фитомассы и NDVI в ландшафте определяется одним и тем же правилом независимо от года и месяца наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сезонная динамика фракций фитомассы и NDVI

Средние значения показателей наземной фитомассы и NDVI по месяцам показаны в табл. 1. Данные свидетельствуют о несовпадении сезонных пиков NDVI (май), зеленой фитомассы (июнь), ветоши (июль) и подстилки (август). Смещение сезонных пиков на более поздние сроки от живой фитомассы к ветоши и подстилке отражает нормальный для степи ход процесса трансформации фитомассы (Титлянова и др., 2018). Однако несовпадение пика NDVI и зеленой фитомассы не согласуется с распространенным представлением о прямом индикационном значении NDVI, что приводит к необходимости более детального анализа; его результаты приводятся ниже. В частности, в 2015 г. такое несовпадение отмечалось на 3-х площадках из 12, а в 2020 г. – на 2-х (причем, других). Согласно результатам дисперсионного анализа (по тестам LSD, Newman-Keuls, Tukey) все изученные площадки не отличаются по значениям NDVI в каждом месяце с мая по сентябрь 2015–2018 и 2020 гг., что согласуется с их выбором как представителей одного типа растительности и одинаковых или близких типов сообществ в парах площадок. Исключение составляют 5–6 пар площадок (из 144) в мае, июле и августе; в июне и сентябре достоверных отличий не было совсем.

Общая наземная фитомасса, включающая зеленую массу (G), ветошь (D) и подстилку (L), за весь период измерений подчиняется нормальному распределению, равно как и отдельно за каждый месяц при $p > 0.10$. Это свидетельствует об одно-

Таблица 1. Средние по 12 площадкам значения зеленой и мертвой надземной фитомассы и NDVI по месяцам (наблюдения 2015–2018 и 2020 гг.).

Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Кол-во измерений фитомассы	62	61	54	62	62
Средняя общая зеленая фитомасса (G), г/м ²	106.32	139.39	106.13	89.33	62.91
Стандартное отклонение значений фитомассы G, г/м ²	33.38	41.79	31.7	29.01	23.52
Средняя общая масса ветоши (D), г/м ²	120.9	131.24	153.05	145.92	156.83
Средняя масса подстилки (L), г/м ²	124.7	133.01	151.02	160.89	154.18
Кол-во измерений NDVI	37	38	38	49	37
NDVI	0.56	0.43	0.33	0.28	0.23
Стандартное отклонение значений NDVI	0.05	0.09	0.05	0.03	0.03

родности исследуемой выборки и варьировании растительных сообществ во времени и пространстве под уравновешенным влиянием большой группы факторов, ни один из которых не является главным. Иными словами, сезонные и межгодовые отклонения от “нормативной” фитомассы разнотравно-типчачово-ковыльных степей взаимно компенсируют друг друга. Общая масса ветоши (D) характеризуется нормальным распределением за весь период наблюдений, однако для каждого месяца по отдельности отличия от нормального распределения достоверны. Следовательно, каждый период вегетационного сезона характеризуется неравновесием процесса отмирания зеленой фитомассы фитоценоза и, вероятно, ее потребления консументами и редуцентами (прямыми данными о котором мы не располагаем). Это означает возможность существенных отличий в протекании этого процесса от года к году в зависимости от гидротермических условий. Зеленая фитомасса, ее фракции по агробиологическим группам и масса подстилки нормальному распределению не подчиняются ни в один из месяцев и в целом за период измерений. По этой причине в дальнейшем для статистического анализа использовались непараметрические методы.

Сезонная динамика доли агробиологических групп в фитомассе

По данным 301 измерения на 12 площадках в течение 5 лет (пять раз год) и еще на одной – в течение 2 лет медианное значение доли злаков в зеленой фитомассе – 73% (диапазон от 32 до 96%), а доли разнотравья – всего 12% при максимуме 63%. Зеленая фитомасса в наибольшей степени определяется массой злаков: непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (ККс) составляет 0.85. На втором месте по вкладу разнотравья (ККс = 0.62), на третьем – полукустарнички (ККс = 0.37). При этом статистическая связь фитомассы злаков и разнотравья достаточно слабая, хотя и достоверная (ККс = 0.30) Увеличение фи-

томассы разнотравья резко снижает долю злаков в фитомассе (ККс = –0.67), что, видимо, отражает запаздывание фенофазы наиболее активной вегетации злаков, по сравнению с разнотравьем; в начале сезона это особенно характерно для горевших сообществ. Однако обратное неверно: увеличение фитомассы злаков никак не отражается на доле разнотравья в фитомассе (ККс = 0.02).

Доля запасов живой фитомассы разнотравья в фитоценозе по массе всегда уменьшается от мая, когда в его составе присутствуют эфемеры и эфемероиды (*Pedicularis physocalyx* Bunge, *P. sibirica* Vved., *Iris pumila* L., *Gagea pusilla* (F.W. Schmidt) Schult. & Schult. f., *Tulipa biebersteiniana* Schult. & Schult. f., *Valeriana tuberosa* L.), играющие особенно значительную роль в сообществах после пожаров, к концу вегетационного сезона (рис. 1). На некоторых площадках (7а, 7б, 5а) слабое увеличение доли разнотравья в некоторые годы отмечалось в сентябре. На площадке 5а (низменная аккумулятивно-денудационная равнина) это происходит за счет вегетации и цветения *Taraxacum serotinum* (Waldst. & Kit.) Poir., достигающего значительного обилия в сообществе в связи с залежным характером растительного покрова на этом участке. На площадках 7а и 7б (пологонаклонные денудационные увалы) в конце лета и начале осени основу фитомассы разнотравья формирует *Galatella villosa* (L.) Rchb. f., но абсолютные значения живой фитомассы разнотравья небольшие; увеличение доли разнотравья в общих запасах живой надземной фитомассы определяется существенным снижением запасов живой фитомассы злаков. Доля злаков в фитомассе не обнаруживает однозначной тенденции в течение вегетационного периода, хотя на некоторых площадках (2, 4, 6) она заметно возрастает в сентябре. При этом на указанных площадках запасы фитомассы злаков осенью снижаются или незначительно возрастают (преимущественно за счет *Stipa capillata* L.), а доля злаков в запасах живой надземной фитомас-

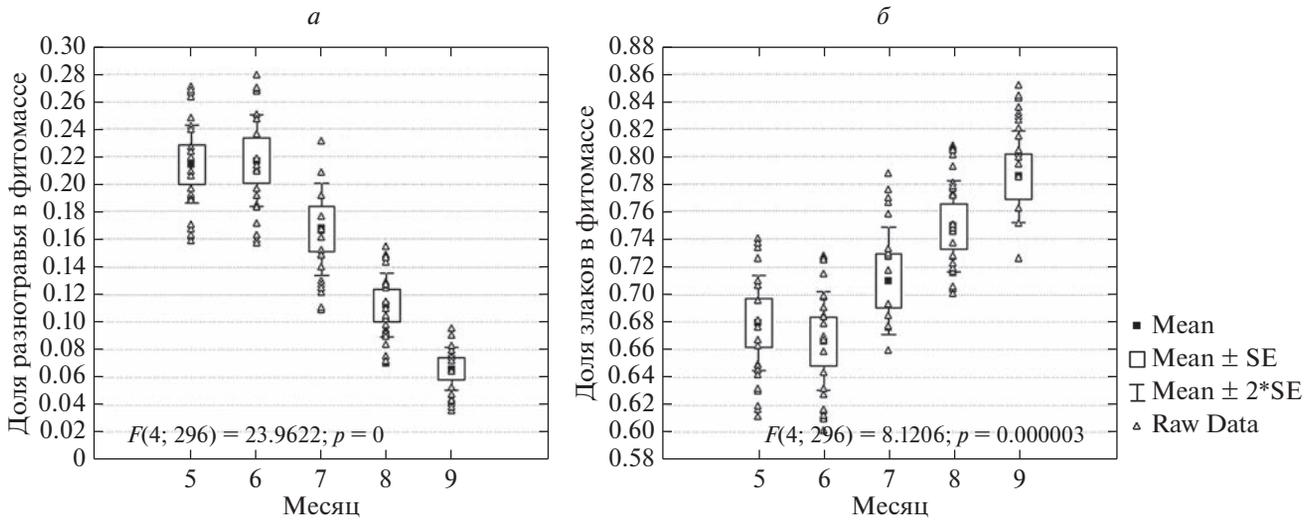


Рис. 1. Внутрисезонное (май-сентябрь) варьирование доли разнотравья (а) и злаков (б) в живой фитомассе за 2015–2020 гг. Mean – среднее, SE – стандартная ошибка, Raw Data – данные измерений на площадках.

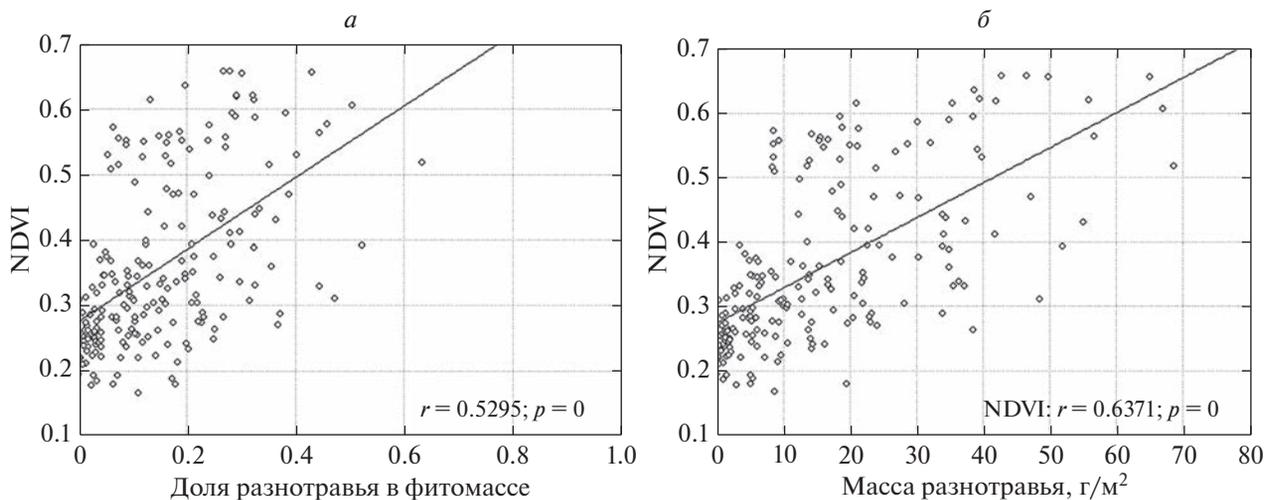


Рис. 2. Зависимость NDVI от доли разнотравья в живой фитомассе (а) и живой фитомассы разнотравья (б). r – Коэффициент корреляции Пирсона, p – уровень значимости.

сы увеличивается за счет снижения фитомассы разнотравья, а иногда и полукустарничков.

Зависимость NDVI от сезонных изменений состава фитоценоза (гипотеза 1)

Оценка корреляционной связи по всей совокупности площадок без учета года и сезона показала, что NDVI наиболее достоверно коррелирует с массой разнотравья (ККс = 0.68) (рис. 2) и долей разнотравья в фитомассе (ККс = 0.57), хотя зеленая фитомасса как таковая определяется в основном злаками (ККс = 0.85). Более того, при доле злаков в фитомассе более 0.8 и при большой фитомассе злаков (обычно в августе и сентябре) NDVI

имеет тенденцию к снижению: исключаются значения более 0.3 (рис. 3). В связи с этим требует проверки гипотеза о частичном экранировании преобладающих в живой массе злаков ветошью, результаты которой приводятся ниже.

Зависимость информативности NDVI от фазы вегетационного периода (гипотеза 2)

Оценка проведена по совокупности измерений на 13 площадках в течение 5 лет за 16 сроков, обеспеченных безоблачными космоснимками. Выявлены помесечные различия в информативности NDVI как индикатора общей фитомассы и фитомассы отдельных агробиологических групп

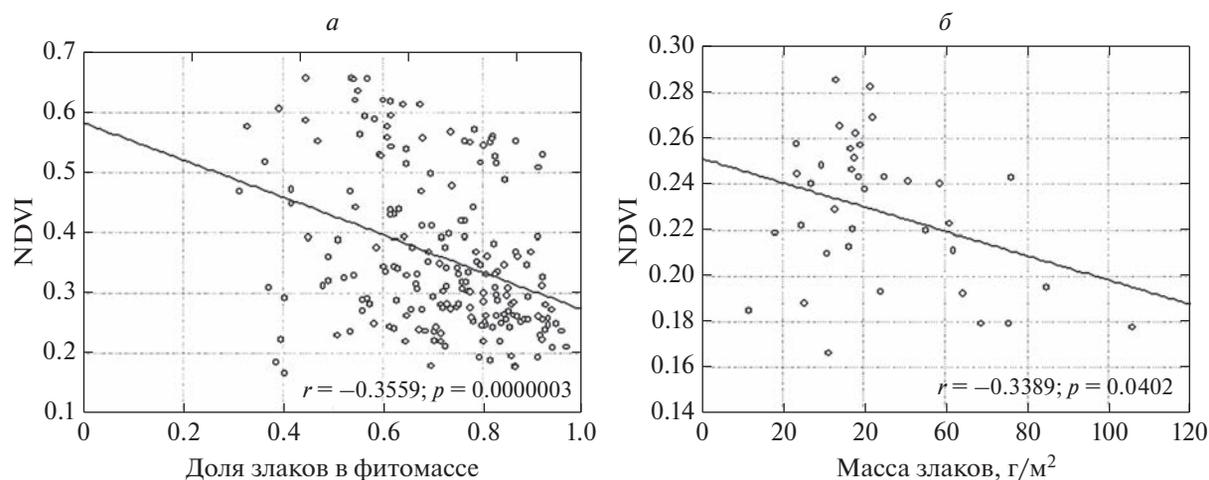


Рис. 3. Зависимость NDVI от доли злаков в живой фитомассе за все месяцы (*а*) и от живой фитомассы злаков в сентябре (*б*) за 2015–2020 гг. r – коэффициент корреляции Пирсона, p – уровень значимости.

(табл. 2). Обращает на себя внимание, что единой тенденции роста или снижения в течение года информативности NDVI как показателей фитомассы нет. В мае и июне зависимость NDVI от массы разнотравья более тесная, чем от массы злаков. В июле NDVI определяется в основном массой злаков. В августе эти две группы вносят примерно одинаковые вклады. Несколько более сильная зависимость NDVI от массы разнотравья проявляется в невозможности низких значений NDVI (менее 0.27) при большой массе разнотравья. При малой массе разнотравья (до 15 г/м²), возможен большой диапазон значений NDVI – от 0.22 до 0.35, т.е. вносят вклад другие группы растений, особенно полкустарнички, что характерно в некоторые годы для площадок 2Б, 7Б, 1А, находящихся в разных условиях рельефа.

В сентябре NDVI не зависит от массы и доли разнотравья и злаков, но при этом появляется парадоксальная положительная (в отличие от других месяцев) связь с показателями, характеризующими превышение мортмасс (ветоши, подстилки, суммарной мортмассы) над живой массой, что требует отдельного пояснения.

Логика сезонного ритма степей подсказывает обратное: в сентябре усиленное отмирание живой массы и, соответственно, накопление ветоши должно приводить к экранированию фотосинтезирующих органов сухими и снижением NDVI. Однако полученный неожиданный результат целиком обусловлен особенностями фитопродукционного процесса в 2015 г по сравнению с 2017–2018 гг. В 2015 г. все измерения показали низкие NDVI при одновременно малом отношении мортмасс (D, G, M) к живой массе. Иными словами, ветошь не могла оказать большое экранирующее влияние на живые зеленые органы, масса которых была достаточно большой для начала осени

благодаря наиболее теплоте за 2000–2021 гг. сентябрю (+15.6°). Сравнение структуры фитомассы показало, что в 2015 г., по сравнению с 2017 и 2018 гг., на некоторых площадках была существенно выше масса и доля живых злаков (5А, 5Б, 7Б) и полкустарничков (1А, 1Б, 2А). Однако площадки с высокой (по сравнению с 2017 и 2018 гг.) массой злаков и полкустарничков отличались низкими значениями NDVI. Иными словами, возобновление вегетации злаков (но не разнотравья) в очень теплом сентябре 2015 г. сопровождалось ростом фитомассы, но снижением NDVI. Хорошо видно, что при сопоставимых значениях живой фитомассы (40–80 г/м²) в мае и сентябре 2015 г. (рис. 4), фотосинтетическая активность, приводящая к росту NDVI, была существенно выше весной.

Зависимость информативности NDVI от гидротермических условий (гипотеза 3)

Известна высокая чувствительность NDVI к температурам и осадкам (Рулев и др., 2016). Проверка гипотезы была несколько затруднена неодинаковой представленностью данных NDVI по месяцам из-за отсутствия безоблачных космоснимков близких к сроку наземного измерения фитомассы. Среднемесячные гидротермические показатели (температуры и осадки) ни для одного из пяти месяцев сезона не дали однозначных объяснений повышенных или пониженных корреляций по сравнению с другими годами. Межгодовые различия в информативности NDVI показаны в табл. 3.

Из всех показателей живой фитомассы наиболее устойчивой от года к году оказалась положительная связь NDVI с массой разнотравья, хотя с долей разнотравья связь проявляется не каждый год. Зависимость NDVI от общей живой массы и

Таблица 2. Коэффициент корреляции Спирмена между значениями NDVI и показателями фитомассы по совокупности наблюдений на всех площадках в 2015–2018, 2020 гг. (245 измерений)

Показатель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Общая живая фитомасса G	0.38	0.67	0.64	0.54	-0.37
Злаки Z	0.07	0.25	0.59	0.35	-0.20
Разнотравье R	0.61	0.54	0.18	0.40	-0.27
Бобовые	-0.16	0.18	0.15	0.10	0.04
Осоки	0.29	0.14	0.10	0.13	-0.12
Полукустарнички	0.36	0.07	0.04	0.10	-0.25
Кустарнички	0.03	0.09	0.23	0.02	–
Z/G	-0.51	-0.36	0.10	-0.30	0.22
R/G	0.36	0.38	0.01	0.29	-0.15
Ветошь злаков Dz	-0.01	-0.20	0.08	-0.12	0.30
Ветошь разнотравья Dг	0.40	0.38	0.12	0.42	-0.19
Подстилка L	-0.03	-0.36	0.09	-0.04	0.23
Ветошь общая Dt	0.05	-0.18	0.08	0.02	0.23
Мортмасса M	0.04	-0.25	0.13	-0.01	0.25
Фитомасса надземная F = G + V + L	0.10	-0.04	0.29	0.10	0.13
Dt/G	-0.12	-0.53	-0.22	-0.28	0.51
L/G	-0.16	-0.53	-0.26	-0.28	0.43
M/G	-0.17	-0.55	-0.32	-0.30	0.51
G/F	0.17	0.55	0.32	0.30	-0.51

Примечание. Жирным курсивом выделены статистически достоверные значения при $p < 0.05$.

массы злаков положительна, но не каждый год достоверна. Информативность NDVI как индикатора живой фитомассы и ее соотношений с мортмассами оказалась наиболее высокой в самый засушливый 2018 г. В наиболее влажный и теплый 2016 г. оказались более слабыми связи NDVI с живой фитомассой и недостоверными – с показателями мортмасс, однако нет достаточных оснований объяснять это именно гидроклиматическими условиями, поскольку мы располагаем данными NDVI только за май и август.

Устойчивы от года к году положительная связь NDVI с долей зеленой массы в общей надземной фитомассе и, наоборот, отрицательные связи NDVI с показателями, характеризующими отношение мортмасс (ветоши, подстилки, общей) к зеленой массе. Эти факты иллюстрируют зависимость NDVI не только от живой фитомассы как таковой, но и от степени перекрытия зеленых органов отмершими (прежде всего – ветошью), которая варьирует по месяцам. Поэтому возникает необходимость установить, бывают ли случаи, когда NDVI и живая фитомасса меняются за временной интервал в противоположных направлениях (что противоречит ожидаемой закономерности) и можно ли это объяснить экранированием зеленых органов ветошью или (для низких растений) подстилкой.

Для каждого года было составлены мультирегрессионные линейные модели методом прямого пошагового выбора (Forward stepwise regression, $F = 1$), где зависимая переменная – NDVI, независимые переменные – G, R, Z, Dt, L, M (см. табл. 2, 3). Они показали, что во все годы значения NDVI описываются значениями либо живой фитомассы, либо массы разнотравья, либо совместным эффектом массы разнотравья и массы ветоши (либо общей мортмассы). Максимальное значение доли объясненной дисперсии (коэффициент детерминации R^2) составило 0.73 в 2018 г. (табл. 4), минимальное – 0.40 в 2015 г. В 2018 и 2020 гг. при близких значениях живой массы разнотравья (основного фактора NDVI, как было показано выше) увеличение массы ветоши сопровождалось снижением NDVI. При одинаковой зеленой фитомассе накопление ветоши также способствует снижению NDVI, например, в 2020 г. – в июне по сравнению с маем, в 2016 г. – в августе по сравнению с маем, в 2015 г. – в сентябре по сравнению с маем.

При общем правиле положительной корреляции между зеленой фитомассой и NDVI, массой разнотравья и NDVI обнаружены эпизодические отклонения от этого правила, которые во всех случаях объясняются экранирующей ролью ветоши. Так, в 2018 г. на т. 1А и 1Б падение NDVI от

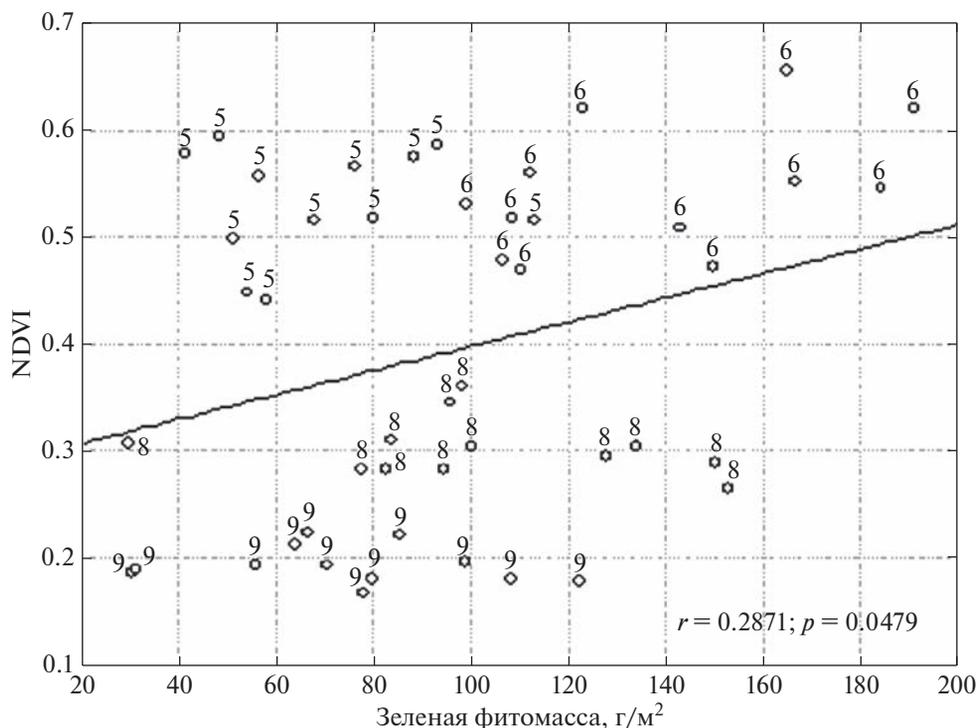


Рис. 4. Соотношение зеленой фитомассы и NDVI в 2015 г. Подписи соответствуют номерам месяцев. r – коэффициент корреляции Пирсона, p – уровень значимости.

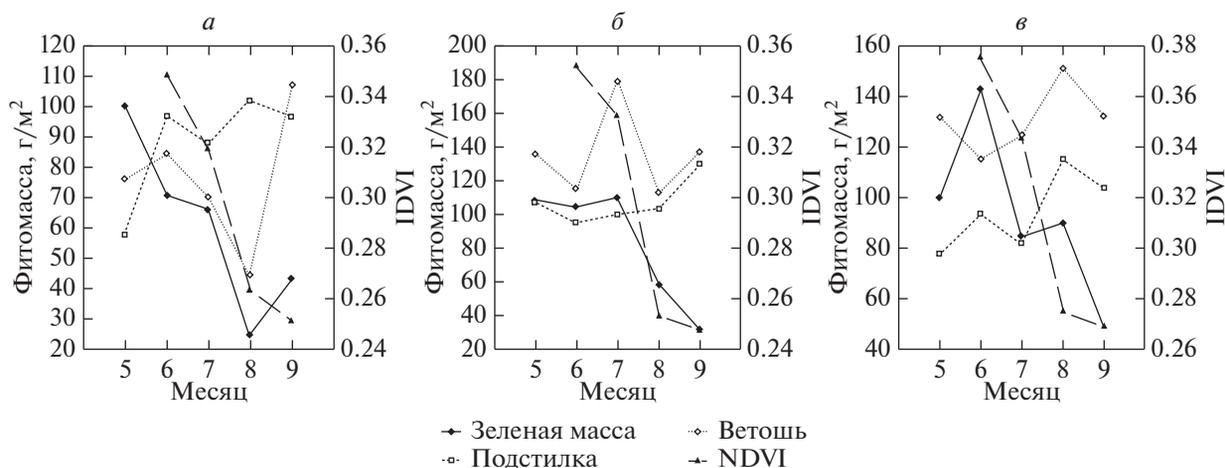


Рис. 5. Сезонная динамика живой фитомассы (FM_green), массы подстилки (Litter), массы ветоши (V_SUM) и NDVI в 2018 г. 5, 6, 7, 8, 9 – номера месяцев. *а* – площадка 1А (низменное пологоувалистое днище балки). *б* – площадка 2А (возвышенная слабонаклонная приводораздельная поверхность). *в* – площадка 4А (низменная плоская денудационно-аккумулятивная равнина).

августа к сентябрю происходило несмотря на рост зеленой фитомассы, но сопряженно с ростом массы ветоши, которая, вероятно, экранировала зеленую фитомассу (рис. 5, *а*). На т. 2А тот же эффект наблюдался от июня к июлю (рис. 5, *б*), на т. 4А и 4Б от июля к августу (рис. 5, *в*).

Зависимость информативности NDVI от индивидуальных особенностей сообщества конкретного урочища (гипотеза 4)

Рассчитывались корреляции для каждой модельной площадки отдельно. Согласно результатам, приведенным в табл. 5, общая закономер-

Таблица 3. Непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена между показателями фитомассы и NDVI по годам (все площадки, все сезоны)

Год	2015	2016	2017	2018	2020
Месяцы, обеспеченные данными NDVI	5, 6, 8, 9	5, 8	7, 8, 9	6, 7, 8, 9	5, 6, 7
Количество измерений	48	24	36	51	39
ГТК Селянинова за период май–сентябрь	0.31	0.58	0.30	0.17	0.30
Показатели	Коэффициент корреляции				
Общая живая фитомасса G	0.23	0.47	0.76	0.82	0.78
Злаки Z	0.00	−0.05	0.72	0.79	0.72
Разнотравье R	0.66	0.76	0.42	0.74	0.37
Бобовые	0.33	−0.20	0.37	0.15	0.29
Осоки	0.16	−0.01	0.02	0.13	0.08
Полукустарнички	−0.11	−0.19	0.03	0.23	0.04
Кустарнички	−0.06	0.14	0.25	Н.д.	0.27
Доля злаков в живой фитомассе Z/G	− 0.42	−0.31	0.00	− 0.34	0.01
Доля разнотравья в живой фитомассе R/G	0.63	0.66	0.25	0.65	0.09
Доля полукустарничков в живой фитомассе	−0.17	−0.24	−0.26	−0.19	−0.18
Ветошь злаков Dz	−0.17	−0.05	0.29	0.02	−0.29
Ветошь разнотравья D _r	− 0.31	0.29	0.08	0.12	−0.26
Ветошь бобовых	− 0.29	−0.16	0.07	−0.04	0.12
Ветошь осок	−0.11	0.08	−0.13	−0.03	0.09
Ветошь полукустарничков	−0.23	−0.36	−0.25	−0.12	−0.14
Подстилка L	−0.17	−0.24	−0.09	0.11	0.06
Ветошь общая Dt	−0.18	−0.08	0.24	0.01	−0.30
Мортмасса M	−0.29	−0.26	0.06	0.12	−0.06
Фитомасса надземная F = G + D + L	−0.12	−0.09	0.28	<i>0.33</i>	0.20
Dt/G	− 0.40	−0.25	− 0.58	− 0.69	− 0.71
L/G	−0.21	−0.33	− 0.60	− 0.59	− 0.44
M/G	− 0.36	−0.29	− 0.66	− 0.68	− 0.60
G/F	0.33	0.29	0.66	0.68	0.60
	Коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения				
G, Z, R, Dt, L, M	0.40	0.58	0.70	0.73	0.62

Примечание. Жирным курсивом выделены статистически достоверные значения при $p < 0.05$.

Таблица 4. Мультирегрессионное уравнение зависимости NDVI от показателей фитомассы в 2018 г. (май–сентябрь, 13 площадок). Метод прямого пошагового выбора при $F = 1$. Достоверные коэффициенты выделены жирным шрифтом.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.73$, Подправленный $R^2 = 0.71$. $F = 31.624$, $p = 0.00000$.

Beta – стандартизованный регрессионный коэффициент; Std.Err. Beta – ошибка коэффициента Beta; Std.Err. B – регрессионный коэффициент; B – ошибка коэффициента B, t – критерий Стьюдента; p – уровень значимости

	Beta	Std.Err. Beta	B	Std.Err. B	t	p -level
Свободный член уравнения			0.24	0.01	16.09	0.00
Живая фитомасса	0.19	0.42	0.00	0.00	0.45	0.66
Живая масса разнотравья	0.40	0.16	0.00	0.00	2.45	0.02
Живая масса злаков	0.43	0.35	0.00	0.00	1.23	0.22
Суммарная масса ветоши	− 0.28	0.08	− 0.00	0.00	− 3.40	0.00

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически достоверные значения при $p < 0.05$.

Таблица 5. Непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена между характеристиками фитомассы и NDVI для 12 площадок (май–сентябрь, 2015–2020 гг.). Буквенный индекс “А” соответствует горевшим площадкам, индекс “Б” – не испытывавшим пожарного воздействия в 2014 г.

	1А	1Б	2А	2Б	4А	4Б	5А	5Б	6А	6Б	7А	7Б
Общая живая фитомасса G	0.59	0.62	0.71	0.74	0.66	0.64	0.34	0.21	0.69	0.77	0.82	0.64
Злаки Z	0.44	0.56	0.59	0.49	0.54	0.30	0.33	0.15	0.38	0.51	0.66	0.61
Разнотравье R	0.80	0.76	0.69	0.70	0.80	0.83	0.29	0.62	0.84	0.86	0.70	0.81
Бобовые	-0.10	0.12	0.62	0.33	0.07	0.01	0.28	0.43	0.50	0.78	0.06	0.17
Осоки	0.49	0.29	0.26	0.36	0.08	-0.42	–	-0.24	0.35	0.34	-0.02	–
Полукустарнички	-0.16	-0.11	0.18	0.59	-0.30	-0.32	-0.38	-0.11	0.50	0.60	0.14	0.06
Кустарнички	0.14	0.36	–	–	–	–	–	–	–	0.31	0.42	0.14
Ветошь злаков Dz	-0.14	0.05	-0.28	-0.05	-0.29	-0.53	-0.17	-0.12	-0.14	-0.27	-0.27	-0.05
Ветошь разнотравья Dg	-0.16	0.07	-0.58	0.02	0.14	-0.64	-0.23	-0.20	-0.34	-0.16	-0.50	-0.46
Ветошь бобовых	-0.27	-0.06	-0.27	-0.04	-0.25	0.03	-0.33	0.04	-0.25	-0.22	-0.06	-0.37
Ветошь осок	0.06	-0.41	-0.20	-0.13	0.08	-0.20	–	–	-0.30	-0.10	-0.18	–
Ветошь полукустарничков	-0.31	0.18	-0.46	0.11	-0.40	-0.27	-0.47	-0.04	-0.44	-0.64	-0.29	-0.24
Подстилка L	-0.44	-0.40	-0.48	-0.28	-0.22	-0.14	-0.34	-0.19	-0.11	-0.26	-0.13	-0.15
Ветошь общая Dt	-0.22	0.08	-0.35	-0.11	-0.32	-0.64	-0.23	-0.18	-0.15	-0.44	-0.27	-0.05
Мортмасса M	-0.31	-0.20	-0.47	-0.25	-0.31	-0.31	-0.28	-0.18	-0.15	-0.42	-0.28	-0.14
Фитомасса F = G + V + L	-0.08	0.14	-0.12	0.06	-0.04	-0.24	-0.23	-0.11	-0.06	-0.21	0.02	0.36
Доля злаков Z/G	-0.22	0.16	-0.36	-0.55	-0.52	-0.76	0.04	-0.35	-0.79	-0.79	-0.38	-0.13
Доля разнотравья R/G	0.67	0.57	0.47	0.60	0.70	0.76	0.25	0.68	0.74	0.73	0.57	0.74
Доля бобовых	-0.11	0.10	0.61	0.26	0.03	0.00	0.20	0.28	0.46	0.64	0.04	0.07
Доля полукустарничков	-0.35	-0.47	-0.04	0.33	-0.47	-0.40	-0.58	-0.15	0.23	0.31	-0.16	-0.38
Dt/G	-0.58	-0.51	-0.74	-0.79	-0.76	-0.87	-0.39	-0.36	-0.59	-0.81	-0.69	-0.58
L/G	-0.56	-0.76	-0.59	-0.64	-0.60	-0.46	-0.44	-0.43	-0.50	-0.70	-0.42	-0.55
M/G	-0.60	-0.71	-0.65	-0.82	-0.78	-0.65	-0.43	-0.43	-0.58	-0.81	-0.58	-0.61
G/F	0.60	0.71	0.65	0.82	0.78	0.65	0.43	0.43	0.58	0.81	0.58	0.61

Примечание. Жирным курсивом выделены статистически достоверные значения при $p < 0.05$.

ность сохраняется, подтверждается большими по модулю значениями коэффициентов и является единой для большинства площадок. Основной вклад в значения NDVI на любой площадке вносит масса разнотравья, вклад злаков всегда меньше. Разница в тесноте связей на горевших и негоревших площадках наиболее четко проявляется в урочищах приводораздельных поверхностей возвышенных равнин (2А и 2Б, 6А и 6Б): на негоревших площадках (с индексом Б) связи NDVI являются более надежным индикатором соотношения живой и мертвой массы, чем на горевших. На остальных площадках это различие тоже есть, но очень незначительное. Рост доли ветоши и подстилки в надземной фитомассе сопровождается снижением значений NDVI. Из общего правила четко выделяются слабыми корреляциями площадки 5А и 5Б, которые, в отличие от остальных, расположены на залежном участке и относятся к ковыльковой (*Stipeta lessingiana*) формации. Фитомасса злаков оказывает наибольшее влияние на NDVI (обычно за счет июня-июля) на площадках 7А и 7Б. Эти площадки отличается наибольшим

разнообразием ковылей: *Stipa capillata*, *S. lessingiana*, *S. pulcherrima*, *S. zalesskii*. Помимо ковылей в сообществах встречаются другие плотнодерновинные (*Festuca valesiaca* *Koeleria cristata*) и рыхлодерновинные (*Poa transbaicalica*, *Agropyron pectinatum*) злаки. Эти площадки расположены у северо-восточной границы заповедника на пологовыпуклом увале северного простираания и отличаются наименьшей массой и долей разнотравья по сравнению с другими площадками. Однозначной закономерности различий тесноты связи между горевшими и негоревшими площадками не обнаружено.

Зависимость информативности NDVI от ландшафтной позиции сообществ (гипотеза 5)

Предполагалось, что различия фракций фитомассы между аналогичными сообществами разных условий рельефа и микроклимата могут в той или иной степени отражаться вегетационными индексами.

Коэффициенты корреляции Спирмена, полученные по выборке 13 площадок отдельно для

каждого срока, показывают, на первый взгляд, парадоксальные результаты. Для некоторых майских, июньских и июльских сроков получены положительные корреляции (0.58–0.74) NDVI с показателями мортмасс (ветошь, подстилка, общая мортмасса) и их отношениями к живой фитомассе. По смыслу вегетационного индекса такого не должно быть: NDVI должен увеличиваться с ростом массы зеленых органов и уменьшаться – с ростом массы отмерших органов, которые к тому же, как показано выше, могут маскировать живые листья низких растений. Однако обращает на себя внимание, что для тех же сроков зафиксированы положительные достоверные корреляции (0.64–0.80) с общей живой фитомассой и/или массой живого разнотравья и злаков. Иначе говоря, чем больше зеленой фитомассы накопило степное сообщество к конкретному сроку наблюдения, тем больше оно содержит и мортмасс. Достоверные связи между живой фитомассой и NDVI определяются различиями сообществ по положению в рельефе. Исследованные площадки образуют три группы. Наиболее высокие значения фитомассы и NDVI характерны для сообществ возвышенных (380–410 м) увалов и приводораздельных поверхностей (тт. 6А, 6Б, 2А, 2Б). Самые низкие значения живой фитомассы и NDVI в разные месяцы и годы обычно характерны для сообществ низменных пологоувалистых равнин с наследием пахотного режима (тт. 5А, 5Б) и увалистого днища балки (тт. 1А, 1Б). Возможно, этот факт отражает негативное влияние стекания холодного воздуха в понижения с высотой 260–280 м на фитопродукционный процесс. Третью группу образуют площадки низменных равнин с наследием пастбищной дигрессии (тт. 4А, 4Б) и пологой поверхности увала (тт. 7А, 7Б), которые имеют промежуточные характеристики.

В сентябре наблюдается ослабление информативности NDVI как индикатора различий фитомассы на площадках. Это объясняется, видимо, минимальной вариабельностью (оцененной по среднеквадратическому отклонению) NDVI и живой надземной фитомассы между площадками по сравнению с другими месяцами. Фактически, по этим двум показателям модельные площадки в сентябре ничем не отличаются друг от друга. В целом за год пространственная вариабельность NDVI в группе модельных площадок убывает от мая и июня к сентябрю. В то же время для вариабельности живой надземной фитомассы как таковой сезонная тенденция отсутствует. По значениям среднеквадратического отклонения выделяется только июнь: вариабельность больше, чем в мае и сентябре, но не отличается от вариабельности в июле и августе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование показало, что NDVI как индикатор зеленой фитомассы определяется соотношением массы агробиологических групп. Вклад этих групп в фитомассу определяется различием в сезонной динамике запасов фитомассы злаков и разнотравья, а также с некоторой ролью полукустарничков. При этом если сезонный тренд запасов живой фитомассы злаков и разнотравья нередко совпадает, то абсолютные значения и доли, напротив обычно существенно различаются. Полукустарнички во второй половине лета поддерживают формируемую за счет разнотравья тенденцию к снижению доли злаков в общих запасах живой надземной фитомассы. В ходе сезонной динамики запасы фитомассы разнотравья и полукустарничков либо достигают наиболее высоких значений одновременно, совместно уменьшая долю злаков в укосах, либо компенсируют пиковые значения запасов фитомассы друг друга. Увеличение запасов фитомассы полукустарничков, активный прирост которых приходится на летнее время (*Astragalus macropus* Bunge, *Eremogone koriniana* (Fisch. ex Fenzl) Ikonn., *Onosma simplicissima* L., *Thymus marschallianus* Willd.) позволяет сохранять эту закономерность при увеличении запасов живой фитомассы злаков или некотором снижении живой фитомассы разнотравья. В позднелетний и осенний периоды значения запасов живой фитомассы полукустарничков, активный прирост которых приходится на это время (*Artemisia austriaca* Jacq., *A. marschalliana* Spreng.) достигают максимальных пиковых значений, в то время как запасы живой фитомассы разнотравья минимальны. Таким образом, полукустарнички в конце сезона принимают на себя роль “регулятора” доли злаков в общих запасах живой надземной фитомассы. Это подтверждается статистически значимой корреляцией долей злаков и полукустарничков ($KKc = -0.49$).

Вегетационный индекс NDVI оказался весьма чувствительным не столько к запасам зеленой фитомассы как таковой (которые в изученном степном ландшафте контролируются, главным образом, злаками), сколько к массе и доле разнотравья и соотношению живой и мертвой фитомассы. На площадках с наибольшими статистически значимыми показателями корреляции NDVI и живой фитомассы разнотравья в этой группе наиболее обильны: *Achillea nobilis*, *Artemisia armeniaca*, *Centaura marschalliana*, *Dianthus campestris*, *Falcaria vulgaris*, *Galatella villosa*, *Galium octonarium*, *G. ruthenicum*, *Medicago romanica*, *Oxytropis spicata*, *Potentilla humifusa*, *P. orientalis*, *Salvia stepposa*, *Scorzonera stricta*. На горевших площадках в первые годы после пожара велико обилие *Sisymbrium polymorphum*, *Tulipa biebersteiniana*, *Scorzonera austriaca*,

Ferula tatarica, *Eremogone biebersteinii*, *Scorzonera stricta*.

Следует принимать во внимание, что информативность NDVI варьирует в течение теплого периода. Этот результат согласуется с литературными данными по фитомассе степной растительности (Немцева, 2018). Общая живая фитомасса более четко коррелирует с индексом в июне и июле, слабее – в конце сезона. В поздневесеннее и раннелетнее время NDVI наиболее тесно связан с разнотравьем. Это объясняется тем, что в этот период большинство видов разнотравья характеризуются наиболее активной вегетацией и цветением. В мае в составе разнотравья присутствуют эфемеры и эфемероиды, дающие значительную часть фитомассы этой группы, особенно на недавно выгоревших участках. В июле, несмотря на наступление закономерной для степей паузы вегетации, основная фотосинтетическая активность, отражаемая NDVI, приходится на злаки. В августе и сентябре функцию поддержания фитомассы при слабом развитии разнотравья берут на себя полукустарнички, переходящие в фазу цветения и всплеска вегетации. Итак, NDVI может принимать большие значения либо при высокой доле разнотравья, либо при высокой доле полукустарничков.

Наши данные показали, что не всякий рост зеленой фитомассы приводит к росту NDVI, а лишь соответствующий определенной фазе вегетационного периода. В 2015 г. при одинаковой фитомассе NDVI имело более высокие значения в мае, чем в сентябре, который отличался высокой температурой и влажностью и активной вегетацией злаков. Для пшеницы также отмечалось, что одни и те же значения NDVI могут соответствовать разной площади ассимиляционной поверхности в зависимости от фазы развития (Гулянов, 2019). Следует отметить, что не только на исследуемых площадках, но и во всем ландшафте междуречья Урты-Бурты и Бурлы (в том числе в заповедной Буртинской степи) в сентябре 2015 г. была повышена встречаемость низких значений NDVI (0.1–0.2) по сравнению с другими годами десятилетия, за исключением экстремально жаркого 2010 г. и экстремально холодного сентября 2019 г. (+10.6°).

В целом подтвердилась гипотеза о возможности экранирования зеленой массы ветошью, что приводит к снижению NDVI несмотря на отсутствие уменьшения зеленой фитомассы. Это далеко не всегда является общим правилом; скорее, свидетельствует о возможности (но необязательности) искажений ожидаемых положительных корреляций между NDVI и живой фитомассой (прежде всего – разнотравья, в меньшей степени – злаков), особенно в сентябре.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что NDVI отражает не столько реаль-

ную зеленую фитомассу, сколько информацию о балансе производства новой зеленой массы и производства мортмассы. Вегетационные индексы NDVI могут занижать реальную зеленую фитомассу, если происходит резкий прирост массы ветоши, обычно – во второй половине лета и начале осени, но иногда и в июне. Немаловажное влияние оказывает история развития фитоценозов: для фитоценозов залежей и бывших гарей индекс NDVI существенно менее информативен как индикатор живой фитомассы, чем для ненарушенных участков. На более низкую информативность вегетационных индексов на залежных участках степей, по сравнению с коренными сообществами имеются указания и в литературе (Аюржанаев и др., 2021).

Анализ состава и структуры фитоценозов показал, что каждое сообщество использует свои механизмы для достижения необходимого уровня живой надземной фитомассы. Так, площадки, поддерживающие стабильно высокую (относительно других) фитомассу (тт. 6А, 6Б, 2А, 2Б), характеризуются всегда большим, чем на других площадках количеством видов полукустарничков, присутствием плотнoderновинного злака *Helictotrichon desertorum* (Less.) Nevski, наибольшими значениями проективного покрытия *Koeleria cristata* (L.) Pers. По-видимому, менее стабильно на поддержание высокого уровня живой фитомассы влияет присутствие в составе сообществ рыхлoderновинного злака – *Agropyron pectinatum* (M. Bieb.) P. Beauv., высокое обилие которого характерно для участков 4 и 7, повышенное обилие *Stipa capillata* L., свойственное растительным сообществам на участках 4, 6, 7, присутствие корневищных злаков стабильно отмеченное в фитоценозах площадок 4А, 4Б и 6А и в отдельные годы – 2Б и 7Б. При этом относительно высокое разнообразие разнотравья (по количеству видов), а также высокая доля его в формировании общего проективного покрытия фитоценоза характерны как для площадок со стабильно высокими показателями запасов живой фитомассы и NDVI (6А, 6Б), так и с промежуточными (7А, 7Б) и низкими (1Б). Сходная закономерность наблюдается и при рассмотрении отдельно многолетнего разнотравья. Присутствие однолетников и двулетников, видимо, определяет низкие значения живой фитомассы и NDVI. Больше их количество и проективное покрытие на участках 1, 4, 7.

Геоморфологические и микроклиматические факторы пространственного варьирования NDVI наиболее ярко проявляются в период нарастания фитомассы, а с наступлением летней паузы вегетации различия фитопродукционного функционирования между площадками сглаживаются. Иными словами, различия между площадками, обусловленные ландшафтными факторами, наи-

более ярко проявляются в июне, т.е. в период максимального накопления фитомассы.

Приведенные факты доказывают, что запасы живой надземной фитомассы и NDVI несут несколько разную информацию. NDVI индицирует не столько зеленую фитомассу как таковую, сколько ее соотношение с мортмассой, прежде всего – с ветошью. Имеющиеся временные ряды данных, характеризующих интенсивность процессов образования и минерализации фитомассы в горевших и негоревших сообществах позволяют на следующих этапах исследования проверить гипотезу о связи между NDVI и параметрами продукционного процесса.

ВЫВОДЫ

1. В степи с заповедным режимом NDVI отражает отношение живой надземной массы к надземной мортмассе, преимущественно ветоши, а не живую надземную фитомассу. Большая масса высокой ветоши может занижать значения NDVI как индикатора живой фитомассы.

2. Хотя основную надземную массу составляют злаки, основной вклад в формирование значения NDVI среди агробиологических групп вносит надземная масса живого разнотравья.

3. Информативность NDVI как индикатора надземной фитомассы меняется по сезонам года и уменьшается в раннеосенний период.

4. NDVI более адекватно отражает состояние надземной фитомассы степных сообществ, длительное время не подвергавшихся воздействию пожаров, по сравнению с горевшими сообществами.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00464).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.П. Ашихмину за участие в подготовке дистанционных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аюржанаев А.А., Алымбаева Ж.Б., Жарникова М.А., Содномов Б.В. О возможности оценки надземной фитомассы степной растительности с помощью цветных вегетационных индексов (по данным съемки с беспилотных систем) // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2021. № 4. С. 45–53.

Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Смирнов В.В., Родин Л.Е., Нечаева Н.И., Левин Ф.И. Методы изучения биологи-

ческого круговорота в различных природных зонах. Москва: Мысль, 1978. 185 с.

Гонн Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 3. С. 66–74.

Гулянов Ю.А. Мониторинг фитометрических параметров с использованием инновационных методов сканирования посевов // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 3(19). С. 64–76.

<https://doi.org/10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76>

Дусаева Г.Х., Калмыкова О.Г., Дусаева Н.В. Влияние пожара на динамику подземной фитомассы степных фитоценозов на участке “Буртинская степь” Оренбургского заповедника // Экосистемы. 2020. № 24(54). С. 83–92.

Дусаева Г.Х., Максумова Н.В. Сезонная динамика запасов надземной фитомассы в разнотравно-овсецово-типчакково-залесскоковыльном сообществе с *Poa transbaicalica* и *Spiraea crenata* // Вестник Оренбургского государственного университета. 2017. № 11(211). С. 79–83.

Дусаева Г.Х., Максумова Н.В., Калмыкова О.Г. Сезонная динамика надземной фитомассы разнотравно-овсецово-типчакково-залесскоковыльного сообщества // Сохранение разнообразия растительного мира Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии: история, современность, перспективы. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2016. С. 67–69.

Елсаков В.В. Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 71–79.

Елсаков В.В., Телятников М.Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.

Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Лапенко Н.Г., Самофал Е.В., Сторчак И.Г. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66

Жуков А.В., Кунах О.Н., Задорожная Г.А., Андрусевич Е.В. Ландшафтная экология как основа пространственного анализа продуктивности агроценозов // Ecology and poospherology. 2013. V. 24. № 1–2.

Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Шарая Л.С., Цепкова Н.Л., Сурова Н.А. Высокогорная геоэкология в моделях. М.: Наука, 2010. 487 с.

Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Изв. Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 2. С. 207–217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>

Калмыкова О.Г. О растительном покрове Госзаповедника “Оренбургский” // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1(4). С. 1024–1026.

- Красная книга почв Оренбургской области. Екатеринбург, 2001. 295 с.
- Курганович К.А., Голятина М.А. Пространственно-временной отклик NDVI на изменение климатических характеристик в Забайкальском крае за период 2000–2014 гг. // Вестник ЗабГУ 2015. № 09(124). С. 10–20.
- Лиджиева Н.Ц., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона Черные земли // Известия Саратовского университета. 2012. Т. 12. Сер. Химия. Биология. Экология. Вып. 2. Научный отдел 94.
- Максимова Н.В., Дусаева Г.Х., Калмыкова О.Г. Сезонная динамика надземной фитомассы разнотравно-типчаково-красивейшековыльно-залесскоковыльного сообщества // Сохранение разнообразия растительного мира Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии: история, современность, перспективы. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2016. С. 77–80.
- Михайлов В.В., Спасивцев А.В., Соболевский В.А. Многомодельное оценивание динамики фитомассы растительных сообществ тундры на основе спутниковых снимков // Исследование Земли из космоса. 2021. № 2. С. 15–30.
- Немцева Л.Д., Беспалова Л.А., Голубева Е.И., Михайлов С.И. Оценка состояния растительного покрова сухостепных ландшафтов в условиях выпаса с применением методов дистанционного зондирования Земли // Труды ЮНЦ РАН. Т. VII. 2018. С. 151–164.
- Полевая геоботаника. Под общ. ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. М.-Л.: Наука, 1964. Т. 3. 442 с.
- Работнов Т.А. Фитоценология. Москва: Изд-во МГУ, 1992. 350 с.
- Рулев А.С., Канищев С.Н., Шинкаренко С.С. Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 113–123.
- Савин И.Ю., Танов Э.Р., Харзинов С. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 51–65.
- Сафронова И.Н., Калмыкова О.Г. Вопросы зональности и роль заповедников в их решении // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1(6). С. 1638–1641.
- Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенов Н.В., Тишков А.А., Ти Тран, Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
- Ярошенко П.Д. Геоботаника. Москва–Ленинград: Изд-во Акад. Наук СССР, 1961. 474 с.
- Araya S., Ostendorf B., Lyle G., Lewis M. Remote sensing derived phenological metrics to assess the spatio-temporal growth variability in cropping fields // Advances in Remote Sensing. V. 6. 2017. P. 212–228.
- de Jong R., Verbesselt J., Schaepman M.E., Bruin S.D. Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change // Glob. Chang. Biol. V. 18(2). 2012. P. 642–655.
- Dusaeva G.Kh., Kalmykova O.G., Dusaeva N.V. Fire influence on dynamics of above-ground phytomass in steppe plant communities in the Burtinskaya steppe (Orenburg state nature reserve, Russia) // Nature Conservation Research. 2019. V. 4. № S1. P. 78–92. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.050>
- Gamon J.A., Huemmrich K.F., Stone R.S., Tweedie C.E. Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt. Remote Sensing of Environment. V. 129. 2013. P. 144–153.
- Gao Y., Huang J., Li S., Li Sh. Spatial pattern of non-stationarity and scale-dependent relationships between NDVI and climatic factors – A case study in Qinghai-Tibet Plateau, China // Ecological Indicators. V. 20. 2012. P. 170–176.
- Han J.C., Huang Y., Zhang H., Wu X. Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China // J. Environmental Management. V. 232. 2019. P. 1037–1048.
- Lyle G., Lewis M., Ostendorf B. Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale // Remote Sensing. V. 5. 2013. P. 1549–1567.
- Maynard J.J., Levi, M.R. Hyper-temporal remote sensing for digital soil mapping: characterizing soil-vegetation response to climatic variability // Geoderma. V. 285. 2017. P. 94–109.
- Nagy A., Fehér J., Tamás T. Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics // Computers and Electronics in Agriculture. V. 151. 2018. P. 41–49.
- Peng W., Kuang T., Tao T. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China // J. Cleaner Production. V. 233. 2019. P. 353–367.
- Piao S.L., Nan H.J., Huntingford C., Ciais P., Friedlingstein P., Sitch S., Peng S.S., Ahlstrom A., Canadell J.G., Cong N., Levis S., Levy P.E., Liu L.L., Lomas M.R., Mao J.F., Myrneni R.B., Peylin P., Poulter B., Shi X.Y., Yin G.D., Viovy N., Wang T., Wang X.H., Zaehle S., Zeng N., Zeng Z.Z., Chen A.P. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity // Nat. Commun. V. 5. 2014. 5018.
- Piedallu C., Chéret V., Denux J.P., Perez V., Azcona J.S., Seynave I., Gégout J.C. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type // Science of The Total Environment. V. 651. P. 2. 2019. P. 2874–2885.
- Verhulst N., Govaerts B. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. Mexico, D.F.; CIMMYT. 2010.
- Zhao Z., Gao J., Wang Y., Liu J., Li S. Exploring spatially variable relationships between NDVI and climatic factors in a transition zone using geographically weighted regression // Theoretical and Applied Climatology. V. 120(3–4). 2015. P. 507–519 <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1188-x>

Evaluation of the NDVI Index as a Source of Information on Aboveground Phytomass in Steppes

A. V. Khoroshev¹, O. G. Kalmykova², and G. Kh. Dusaeva²

¹Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

The complexity of phytomass measurements on sample plots hinders the extrapolation of plot-related data to areas comparable to land use or landscape units. Vegetation indices calculated from satellite images are usually considered as indicators of green phytomass and are used for its areal estimates. The study solves the problem of establishing the information content of the normalized difference vegetation index NDVI depending on the fractional structure of living and dead aboveground phytomass, seasonal dynamics of the biological cycle, hydrothermal conditions and landscape position. We used the results of monthly measurements of aboveground phytomass fractions at 13 sites covered by *Stipa zaleskii* and *Stipa lessingiana* formations in the Burtinskaya steppe (Orenburgsky nature reserve) from May to September in 2015–2020. For each period, NDVI values were calculated from Landsat satellite images at all sites. Hypotheses about geobotanical, hydrothermal, phenological and landscape factors of NDVI informativity were tested by using the Spearman correlation coefficients, analysis of variance and multiple regression. The discrepancy between the seasonal peaks of NDVI and green phytomass is not consistent with the common opinion of a direct indicator value of NDVI. The total live biomass correlates more clearly with the index in June and July but weaker at the end of the season. NDVI turned out to be sensitive not so much to green phytomass as such, but to the mass and proportion of forbs and the ratio of live and dead phytomass. In late spring and early summer, NDVI is most closely associated with forbs while in July – with grasses. The hypothesis about the possibility of screening green mass with standing dead biomass was confirmed, which leads to a decrease in NDVI despite the absence of a decrease in green phytomass. NDVI may underestimate the real green phytomass if there is a sharp increase in the mass of dead biomass, usually in the second half of summer and early autumn. NDVI more adequately reflects the state of the aboveground phytomass of steppe communities that have not been exposed to fires for a long time, compared to burned communities and fallows.

Keywords: NDVI, Burtinskaya steppe, phytomass fractions, forbs, dead biomass, seasonal dynamics, fallow, burned area

REFERENCES

- Ayurzhanayev A.A., Alymbayeva Zh.B., Zharnikova M.A., Sodnomov B.V. O vozmozhnosti otsenki nadzemnoy fitomassy stepnoy rastitel'nosti s pomoshch'yu tsvetnykh vegetatsionnykh indeksov (po dannym s'emki s bespilotnykh sistem) [On the possibility of assessing the above-ground phytomass of steppe vegetation using colored vegetation indices (according to survey data from unmanned systems)] // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, geografiya. 2021. № 4. P. 45–53. (In Russian).
- Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., Smirnov V.V., Rodin L.E., Nechaeva N.I., Levin F.I. Metody izucheniya biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnykh zonakh. [Methods for studying the biological cycle in various natural zones]. Moskva: Mysl', 1978. 185 p. (In Russian).
- Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Otsenka vliyaniya mezorel'efa sklona na prostanstvennyuyu izmenchivost' svoystv pochvy i kharakteristiki rastitel'nogo pokrova po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Evaluation of the influence of the slope mesorelief on the spatial variability of soil properties and vegetation cover characteristics according to Earth remote sensing data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2016. № 3. P. 66–74. (In Russian).
- Gulyanov Yu.A. Monitoring fitometricheskikh parametrov s ispol'zovaniem innovatsionnykh metodov skanirovaniya posevov [Monitoring of phytometric parameters using innovative crop scanning methods] // Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki. 2019. № 3(19). P. 64–76. (In Russian). <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76>
- Dusaeva G.Kh., Kalmykova O.G., Dusaeva N.V. Vliyaniye pozhara na dinamiku podzemnoy fitomassy stepnykh fitosenozov na uchastke "Burtinskaya step'" Orenburgskogo zapovednika [Influence of fire on the dynamics of the underground phytomass of steppe phytocenoses in the area "Burtinskaya steppe" of the Orenburg Reserve] // Ekosistemy. 2020. № 24(54). P. 83–92. (In Russian).
- Dusaeva G. Kh., Maksutova N.V. Sezonnaya dinamika zapasov nadzemnoy fitomassy v raznotravno-ovsetsovo-tipchakovo-zaleskokovyl'nom soobshchestve s *Poa transbaicalica* i *Spiraea crenata* [Seasonal dynamics of aboveground phytomass stocks in forb-oatmeal-fescue-forest-feather grass community with *Poa transbaicalica* and *Spiraea crenata*] // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. № 11(211). P. 79–83. (In Russian).
- Dusaeva G.Kh., Maksutova N.V., Kalmykova O.G. Sezonnaya dinamika nadzemnoy fitomassy raznotravno-ovsetsovo-tipchakovo-zaleskokovyl'nogo soobshchestva [Seasonal dynamics of the aboveground phytomass of the forb-oat-fescue-zalesko-feather-grass community] // Sokhraneniye raznoobraziya rastitel'nogo mira Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noy Azii: istoriya, sovremennost', perspektivy. Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN, 2016. P. 67–69. (In Russian).
- Elsakov V.V. Sputnikovaya s'emka v otsenke produktivnosti ekosistem Evropeyskogo Severa [Satellite imagery in assessing the productivity of ecosystems in the European North] //

- Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 1. P. 71–79. (In Russian).
- Elsakov V.V., Telyatnikov M.Yu.* Mezhdogodnye izmeneniya indeksa NDVI na territorii evropeyskogo severo-vostoka Rossii i zapadnoy Sibiri v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsiy poslednykh desyatiletii [Interannual changes in the NDVI index in the European North-East of Russia and Western Siberia under the conditions of climatic fluctuations of the last decades] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2013. V. 10. № 3. P. 260–271. (In Russian).
- Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., Samofal E.V., Storchak I.G.* Vozmozhnosti distantsionnoy otsenki sostoyaniya i stepeni degradatsii prirodnykh kormovykh ugodiy [Possibilities of remote assessment of the state and degree of degradation of natural fodder lands] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 7. P. 53–66. (In Russian).
- Zhukov A.V., Kunakh O.N., Zadorozhnaya G.A., Andrushevich E.V.* Landshaftnaya ekologiya kak osnova prostranstvennogo analiza produktivnosti agrosenzozov [Landscape ecology as a basis for spatial analysis of the productivity of agrocenoses] // *Ecology and noospherology*. 2013. V. 24. № 1–2. (In Russian).
- Zalikhanov M.Ch., Kolomyts E.G., Sharaya L.S., Tsepkova N.L., Surova N.A.* Vysokogornaya geoekologiya v modelyakh [Alpine geoecology in models]. Moscow: Nauka, 2010. 487 p. (In Russian).
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B.* Aridizatsiya zasushlivykh zemel' Evropeyskoy chasti Rossii i svyaz' s zasukhami [Aridization of arid lands in the European part of Russia and connection with droughts] // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2020. № 2. P. 207–217. (In Russian).
<https://doi.org/0.31857/S258755662002017X>.
- Kalmykova O.G.* O rastitel'nom pokrove Goszapovednika "Orenburgskiy" [On the vegetation cover of the "Orenburgskiy" State Reserve] // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. V. 14. № 1(4). P. 1024–1026. (In Russian).
- Krasnaya kniga pochv Orenburgskoy oblasti. [Red Book of Soils of the Orenburg Region]. Ekaterinburg, 2001. 295 p. (In Russian).
- Kurganovich K.A., Golyatina M.A.* Prostranstvenno-vremennyy otklik NDVI na izmenenie klimaticheskikh kharakteristik v Zabaykal'skom krae za period 2000–2014 gg. [Spatio-temporal response of NDVI to changes in climatic characteristics in the Trans-Baikal Territory for the period 2000–2014] // *Vestnik ZabGU*. 2015. № 09(124). P. 10–20. (In Russian).
- Lidzhiya N.Ts., Ulanova S.S., Fedorova N.L.* Opyt primeneniya indeksa vegetatsii (NDVI) dlya opredeleniya biologicheskoy produktivnosti fitotsenzozov aridnoy zony na primere regiona Chernye zemli [The experience of using the vegetation index (NDVI) to determine the biological productivity of phytocenoses in the arid zone on the example of the Chernye Zemlya region] // *Izvestiya Saratovskogo universiteta*. 2012. V. 12. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya, vyp. 2. Nauchnyy otdel 94 (In Russian).
- Maksutova N.V., Dusaeva G.Kh., Kalmykova O.G.* Sezonnaya dinamika nadzemnoy fitomassy raznotravno-tipchakovo-krasiveyshekovyl'no-zalesskokovyl'nogo soobshchestva [Seasonal Dynamics of the Aboveground Phytomass of the Forb-Fescue-Beautiful-Fescue-Fescue-Fescue-Feather-feather-grass Community] // *Sokhraneniye raznoobraziya rastitel'nogo mira Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noy Azii: istoriya, sovremennost', perspektivy*. Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN, 2016. P. 77–80. (In Russian).
- Mikhaylov V.V., Spesivtsev A.V., Sobolevskiy V.A.* Mnogomodel'noe otsenivanie dinamiki fitomassy rastitel'nykh soobshchestv tundry na osnove sputnikovykh snimkov [Multi-model estimation of the phytomass dynamics of tundra plant communities based on satellite images] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021. № 2. P. 15–30. (In Russian).
- Nemtseva L.D., Bepalova L.A., Golubeva E.I., Mikhaylov S.I.* Otsenka sostoyaniya rastitel'nogo pokrova sukhostepnykh landshaftov v usloviyakh vypasa s primeneniem metodov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Estimation of the state of vegetation cover of dry-steppe landscapes under grazing conditions using methods of remote sensing of the Earth] // *Trudy YuNTs RAN*. V. VII. 2018. P. 151–164. (In Russian).
- Polevaya geobotanika. [Field Geobotany]. Pod obsch. red. E.M. Lavrenko i A.A. Korchagina. M.-L.: Nauka, 1964. V. 3. 442 p. (In Russian).
- Rabotnov T.A.* *Fitotsenologiya* [Phytocenology]. Moskva: Izd-vo MGU, 1992. 350 p. (In Russian).
- Rulev A.S., Kanischev S.N., Shinkarenko S.S.* Analiz sezonnoy dinamiki NDVI estestvennoy rastitel'nosti Zavolz'hya Volgogradskoy oblasti [Analysis of the seasonal dynamics of NDVI in natural vegetation of the Trans-Volga region of the Volgograd region] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. № 4. P. 113–123. (In Russian).
- Savin I.Yu., Tanov E.R., Kharzinov S.* Ispol'zovanie vegetatsionnogo indeksa NDVI dlya otsenki kachestva pochv pashni (na primere Baksanskogo rayona Kabardino-Balkarii) [Using the Vegetation Index NDVI to assess the quality of arable soils (on the example of the Baksan district of Kabardino-Balkaria)] // *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2015. V. 77. P. 51–65. (In Russian).
- Safronova I.N., Kalmykova O.G.* Voprosy zonal'nosti i rol' zapovednikov v ikh reshenii [Issues of zonality and the role of nature reserves in their solution] // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. V. 14. № 1(6). P. 1638–1641. (In Russian).
- Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Shmakova E.I., Snytko V.A., Dubynina S.S., Magomedova L.N., Nefed'eva L.G., Semenyuk N.V., Tishkov A.A., Ti Tran, Khakimzyanova F.I., Shatokhina N.G., Kyrgys Ch.O., Sambuu A.D.* Biologicheskaya produktivnost' travyanykh ekosistem. Geograficheskaya zakonornosti i ekologicheskie osobennosti [Biological productivity of grass ecosystems. Geographic patterns and ecological features]. Novosibirsk: IPA SO RAN, 2018. 110 p. (In Russian).
- Yaroshenko P.D.* *Geobotanika* [Geobotanics]. Moskva - Leningrad: Izd-vo Akad. Nauk SSSR, 1961. 474 p. (In Russian).
- Araya S., Ostendorf B., Lyle G., Lewis M.* Remote sensing derived phenological metrics to assess the spatio-temporal growth variability in cropping fields // *Advances in Remote Sensing*. V. 6. 2017. P. 212–228.
- de Jong R., Verbesselt J., Schaepman M.E., Bruin S.D.* Trend changes in global greening and browning: contribution of

- short-term trends to longer-term change // *Glob. Chang. Biol.* V. 18(2). 2012. P. 642–655.
- Dusaeva G.Kh., Kalmykova O.G., Dusaeva N.V.* Fire influence on dynamics of above-ground phytomass in steppe plant communities in the Burtinskaya steppe (Orenburg state nature reserve, Russia) // *Nature Conservation Research*. 2019. V. 4. № S1. P. 78–92.
<https://doi.org/10.24189/ncr.2019.050>.
- Gamon J.A., Huemmrich K.F., Stone R.S., Tweedie C.E.* Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt. *Remote Sensing of Environment*. V. 129. 2013. P. 144–153.
- Gao Y., Huang J., Li S., Li Sh.* Spatial pattern of non-stationarity and scale-dependent relationships between NDVI and climatic factors – A case study in Qinghai-Tibet Plateau, China // *Ecological Indicators*. V. 20. 2012. P. 170–176.
- Han J.C., Huang Y., Zhang H., Wu X.* Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China // *J. Environmental Management*. V. 232. 2019. P. 1037–1048.
- Lyle G., Lewis M., Ostendorf B.* Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale // *Remote Sensing*. V. 5. 2013. P. 1549–1567.
- Maynard J.J., Levi, M.R.* Hyper-temporal remote sensing for digital soil mapping: characterizing soil-vegetation response to climatic variability // *Geoderma*. V. 285. 2017. P. 94–109.
- Nagy A., Fehér J., Tamás T.* Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics // *Computers and Electronics in Agriculture*. V. 151. 2018. P. 41–49.
- Peng W., Kuang T., Tao T.* Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China // *J. Cleaner Production*. V. 233. 2019. P. 353–367.
- Piao S.L., Nan H.J., Huntingford C., Ciais P., Friedlingstein P., Sitch S., Peng S.S., Ahlstrom A., Canadell J.G., Cong N., Levis S., Levy P.E., Liu L.L., Lomas M.R., Mao J.F., Myneni R.B., Peylin P., Poulter B., Shi X.Y., Yin G.D., Viovy N., Wang T., Wang X.H., Zaehle S., Zeng N., Zeng Z.Z., Chen A.P.* Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity // *Nat. Commun.* V. 5. 2014. 5018.
- Piedallu C., Chéret V., Denux J.P., Perez V., Azcona J.S., Seynave I., Gégout J.C.* Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type // *Science of The Total Environment*. V. 651. P. 2. 2019. P. 2874–2885.
- Verhulst N., Govaerts B.* The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. Mexico, D.F.; CIMMYT. 2010.
- Zhao Z., Gao J., Wang Y., Liu J., Li S.* Exploring spatially variable relationships between NDVI and climatic factors in a transition zone using geographically weighted regression // *Theoretical and Applied Climatology*. V. 120(3–4). 2015. P. 507–519.
<https://doi.org/10.1007/s00704-014-1188-x>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК НА ПРОЦЕССЫ ОПУСТЫНИВАНИЯ В СЕВЕРНОМ ПРИКАСПИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2023 г. С. С. Шинкаренко^{a, b, *}, А. А. Выприцкий^c, А. А. Васильченко^c, А. Н. Берденгалиева^c

^aВолгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

^bИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^cФедеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, Россия

*E-mail: vnialmi@bk.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022 г.

Пастбищные нагрузки – один из ключевых антропогенных факторов динамики состояния растительного и почвенного покрова аридных ландшафтов. Целью данного исследования является установление пространственного распределения пастбищных нагрузок в регионе Черных земель с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса, геоинформационных технологий и статистических сведений. В работе выполнено картирование животноводческих ферм, кошар и других мест концентрации домашнего скота на 1984–1986 и 2020 гг. Оба периода характеризуются всплеском процессов опустынивания и резким увеличением площадей открытых песков и дефлированных земель. Установлены площади пастбищ с разными нагрузками при выпасе скота, также определены закономерности пространственного распределения подвижных песков в зависимости от почвообразующих пород и удаленности от животноводческих ферм. В последние годы по сравнению с 1984–1986 гг. увеличилась плотность ферм на песчаных почвах, что привело к перевыпасу, уничтожению растительности и активизации эоловых процессов. Примерно на 80% пастбищ превышены допустимые нормы выпаса, а 90% пастбищ расположены в зоне 3 км вокруг мест концентрации скота. Полученные результаты могут использоваться для регулирования пастбищных нагрузок в регионе для предотвращения опустынивания ландшафтов.

Ключевые слова: опустынивание, дистанционное зондирование, Landsat, Калмыкия, Астраханская область, Черные земли

DOI: 10.31857/S0205961423030065, EDN: TYOOGO

ВВЕДЕНИЕ

В 1970–1980-х гг. из-за распашки и чрезмерного выпаса большая часть песчаных земель Калмыкии в районе Черных земель лишилась растительного покрова. Благодаря фитомелиоративным мероприятиям, снижению пастбищных нагрузок и благоприятной климатической флуктуации удалось предотвратить экологическое бедствие в регионе. Однако после периода устойчивого состояния в 2002–2010 гг. вновь усилились процессы опустынивания, и площадь открытых песков на Черных землях к 2019 г. приблизилась к значениям начала-середины 1990-х, а большая часть очагов опустынивания возникла в Астраханской области (Золотокрылин и др., 2020; Золотокрылин, Титкова, 2011; Шинкаренко, 2019; Radochinskaya et al., 2019). Засухи в 2020 и весной 2021 гг. привели к деградации растительности на огромных территориях не только на Черных землях, но и в Ногай-

ской степи и Заволжье. Чрезмерные пастбищные нагрузки при этом привели к интенсификации процессов опустынивания и масштабным пыльным бурям, которые многократно увеличили площади открытых песков и дефлированных земель в регионе (Шинкаренко, Барталев, 2020; Шинкаренко и др., 2020). Результатом этого стала бескормица, из-за которой поголовье только овец и коз в регионе сократилось более чем на 0.5 млн голов (Шинкаренко, Барталев, 2021).

В период снижения поголовья скота и восстановления пастбищ на рубеже XX и XXI вв. в регионе интенсифицировались ландшафтные пожары (Шинкаренко и др., 2022; Dubinin et al., 2010), особенно сильно на особо охраняемых природных территориях и в их окрестностях (Шинкаренко и др., 2021a, 2021b). Поэтому для противопожарной профилактики запрет выпаса скота нежелателен (Dubinin et al., 2011). Пастбищные

нагрузки распределены неравномерно по территории исследований (Kulik et al., 2018), из-за этого требуется уточнение пространственных закономерностей антропогенной нагрузки на ландшафты. Территория имеет огромную природоохранную ценность как местообитание популяции *Saiga tatarica* Северо-Западного Прикаспия. На рубеже 80–90-х гг. прошлого века здесь созданы федеральный заповедник “Черные земли”, три федеральных и один региональный заказник (Karimova et al., 2021). Отчуждение земель под ООПТ уменьшило площадь доступных пастбищ, поэтому поголовье скота было перераспределено.

Целью исследований является определение пространственных особенностей распределения пастбищных нагрузок в Северо-Западном Прикаспии в период активизации процессов опустынивания в 80-х гг. XX в. и в 2020–2021 гг.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследований – регион Черных земель, включает четыре района Республики Калмыкия (Лаганский, Черноземельский, Юстинский, Яшкульский) и три – Астраханской области (Енотаевский, Лиманский, Наримановский). На песчаных почвах преобладают фитоценозы с доминированием *Agropyron* spp., *Festuca* spp., *Stipa* spp., на суглинках – *Artemisia lercheana*, *Poa bulbosa*, *Tanacetum achilleifolium*. Велики площади солонцов и солончаков с галофитной растительностью (*Artemisia pauciflora*, *Camphorosma monspeliaca*, *Kochia prostrata* и др.) (Горяев, 2019). При усилении пастбищных нагрузок растет роль полыни, эфемеров (*Eremopyrum triticeum*, *Anisanta tectorum*, *Ceratocarpus arenarius*) и эфемероидов (*Poa bulbosa*) (Бананова, Лазарева, 2014; Lazareva et al., 2020; Vlasenko et al., 2019). На значительной части песчаных земель было произведено закрепление песков кустарником *Calligonum aphyllum* (Рыбашлыкова и др., 2019).

Животноводческие фермы (“чабанские точки”, места концентрации скота) и пашни выделялись на основе экспертной интерпретации спутниковых изображений видимого диапазона прибора Landsat 5 TM на 1984–1986 гг. и Landsat 8 OLI на 2020 г. пространственного разрешения 30 м. Уточнение границ сельскохозяйственных полей и местоположений ферм производилось с использованием программы Google Earth. К залежам на 2020 г. были отнесены как старовозрастные залежи, необрабатываемые в 80-х гг. прошлого века, так и заброшенные после этого периода земли. Из анализа пастбищных земель исключались только реально используемые пахотные зем-

ли, как богарные, так и орошаемые. Площади открытых песков и дефлированных территорий определены по методике, описанной в (Шинкаренко, 2019) и получены на май 1986 (Шинкаренко, 2019) и 2020 гг. (Шинкаренко, Барталев, 2020, 2021).

Животноводческие фермы обладают достаточно четкими дешифровочными признаками: выделяются цветом и формой. На спутниковых снимках сверхвысокого разрешения можно выделить загоны для скота, жилые здания, поилки. Фермы и ближайшие окрестности отличаются более светлым тоном из-за уничтоженного скотом растительного покрова (Васильченко, Выприцкий, 2021). При этом подобные изменения прослеживаются на расстоянии до нескольких километров от фермы (Кулик и др., 2016; Шинкаренко, 2015; Dara et al., 2020). Также животноводческие фермы являются “узлами” сходящихся грунтовых дорог, поэтому при отсутствии других признаков скопление дорог косвенно свидетельствует о наличии фермы. В непосредственной близости от ферм и поилок, как правило, могут находиться участки, полностью лишенные растительного покрова: открытые пески и котловины выдувания (Шинкаренко, 2019). Плотность животноводческих ферм может быть одним из показателей антропогенной нагрузки, которая ведет к опустыниванию, при этом в настоящее время такой показатель не используется (Trofimov et al., 2015; Zolotokrylin et al., 2016, 2018).

Как показывают проведенные ранее исследования (Кулик и др., 2016; Шинкаренко, 2015; Dara et al., 2020) зона влияния выпаса скота распространяется на расстояние до 3 км от животноводческих ферм. Поэтому площадь пастбищ определялась как площадь земель, которые попадают в зону радиуса 3 км вокруг животноводческих ферм. Также были определены площади пастбищ в меньшем радиусе с интервалом 0.5 км. На более близкие к загонам для животных оказывается большее воздействие, поэтому важно представлять площади пастбищ на разном удалении от ферм. Для этого строились буферные зоны радиусом от 0.5 до 3 км, после чего они объединялись в один объект, а также определялось пересечение буферных зон от смежных ферм. После с получившимися геоинформационными слоями выполнялись оверлейные операции в геоинформационной программе: пересечение границами муниципальных образований, почвенных контуров. Определялись площади открытых песков и дефлированных территорий, попадающие в границы разной удаленности от животноводческих ферм. При сравнении пространственных измене-

ний в размещении ферм учитывались только перемещения более чем на 1 км. Также были определены площади потенциально возможных к использованию пастбищ с помощью инструмента геоинформационной обработки “полигоны Вороного”. Этот инструмент позволяет построить полигоны вокруг точечных объектов, объединив площади, которые расположены к данной точке ближе, чем к любой другой. Таким образом были выделены наиболее близкие к каждой ферме участки. Из площади пастбищ кроме пашни исключались площади соровых понижений, солончаков и водоемов, которые были определены на основе визуального дешифрирования спутниковых данных Sentinel-2 разрешения 10 м, а также границы населенных пунктов. Западный ильменно-бугровой район в данной работе не рассматривался, поскольку отличается ландшафтными условиями. Поэтому распределение пастбищных нагрузок там определяется не столько размещением ферм, сколько пересеченностью местности многочисленными вытянутыми в субширотном направлении водоемами – ильменями.

Кластеризация размещения животноводческих ферм оценивалась на основе индекса ближайших соседей (тест Кларка-Эванса). Индекс ближайшего соседства определяется как отношение рассчитанного среднего расстояния (наблюдаемого) и статистически ожидаемого до ближайших объектов, если бы это количество точек было распределено случайно на той же площади. Если индекс ближайшего соседства меньше единицы, то распределение групповое (объекты кластеризуются); если больше единицы, то распределение равномерное; если же индекс ближайшего соседства равен единице или незначим, то распределение случайное. Чем больше абсолютное значение Z , тем ниже вероятность, что пространственное распределение отражает теоретическую случайную пространственную закономерность. Значения Z , превышающие по модулю 2.58 – соответствуют доверительной вероятности 99% (Mitchell, 2005). Использование этого метода применительно к анализу пространственного распределения животноводческих ферм позволяет определить, насколько равномерно они распределены по территории.

Спутниковые данные получены с помощью сервиса “Vega-Science” (Lourian et al., 2022), функционирующего в рамках ЦКП “ИКИ-Мониторинг” (Лупян и др., 2019). Статистические данные о площадях пастбищ приводятся согласно (Национальный атлас..., 2011) на 2006 г., о поголовье скота в разрезе регионов по данным (Эдельгериев, 2019, 2021), а для муниципальных районов

по Базе данных показателей муниципальных образований (<https://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst.htm>). Достоверные данные в разрезе районов по поголовью скота доступны только с 2007 г. (это связано как с наличием данных в открытом доступе, так и изменением площадей пограничных между Астраханской областью и Калмыкией районов), поэтому пастбищные нагрузки для более раннего периода определены не были. Пастбищные нагрузки определялись как отношение среднего поголовья в условных головах овец на одну ферму в пределах района к площади полигона Вороного вокруг фермы. В реальности контуры пастбищ имеют более сложную форму и могут иметь площадь как большую, так и меньшую. Это же касается и поголовья скота, особенно учитывая большую долю неофициального поголовья (Чешев и др., 2018). Но поскольку не все участки поставлены на кадастровый учет, а их границы не всегда соблюдаются при выпасе, то более точные способы определения актуальных площадей затруднены. Также в границах полигонов Вороного рассчитывались площади открытых песков согласно данным (Шинкаренко, 2019; Шинкаренко, Барталев, 2021) и сопоставлялись с величинами пастбищных нагрузок для полигонов. Нормы пастбищных нагрузок и коэффициенты перевода поголовья в условные головы овец приведены согласно Постановлению Правительства Республики Калмыкия № 158 от 27.04.2006 г., для территории Астраханской области нет точных нормативов допустимых пастбищных нагрузок, поэтому использовались нормативы соседних районов Калмыкии. Почвенные контуры согласно (Почвенная карта, 1988) были загружены в формате ESRI shapefile из Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (<http://egrpr.soil.msu.ru/download.php>). Названия видов сосудистых растений приводятся по работе (Cherepanov, 2007). Геоинформационная обработка и дешифрирование спутниковых данных выполнялись в программе QGIS, в качестве базовой карты использованы слои проекта Open Street Map, границы муниципальных образований, населенных пунктов и особо охраняемых природных территорий также получены с помощью этого сервиса. Статистический анализ выполнен в Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспертного дешифрирования в 1984 году площадь используемой пашни составила 151 тыс. га, а площадь залежных земель 72.5 тыс. га. Наибольшие площади обрабатываемых земель отмечены в Енотаевском и Юстин-

Таблица 1. Площади пастбищ и количество животноводческих ферм в исследованных районах

Район	Площадь пастбищ, тыс. га					Количество ферм, шт.		
	в радиусе 3 км		полигоны Вороного		статистика (2006 г.)	1984	2020	1984 и 2020
	1984	2020	1984	2020				
Енотаевский	338.5	401.1	399.1	438.2	418.8	235	290	186
Лаганский	240.5	194.8	368.9	360.3	248.2	126	88	68
Лиманский	195.6	227.8	317.6	239.2	44.5	126	159	109
Наримановский	341.8	387.3	409.9	418.1	336.2	220	297	190
Черноземельский	633.6	448.8	953.0	808.6	914.7	402	218	184
Юстинский	575.1	542.2	716.1	586.6	732.2	333	302	256
Яшкульский	712.4	659.8	957.6	802.7	991.8	419	360	282
Всего	3037.5	2861.7	4122.2	3653.7	3686.4	1861	1714	1275

ском районах (54.9 и 43.8 тыс. га соответственно). По состоянию на 2020 год 21.6 тыс. га продолжают обрабатываться. Наибольшие площади сохраненных обрабатываемых земель в Енотаевском районе (18.9 тыс. га, 34.4% от первоначальных площадей). Постоянно обрабатываемые земли приурочены к прибрежным участкам правого берега Волги. Сохранили статус залежи 60.6 тыс. га земель, что составляет 83% величин 1980-х гг. Общая площадь заброшенных после 1980-х гг. земель составляет 137 тыс. га. По муниципальным районам этот показатель варьируется от 80 до 96% изначальной обрабатываемой пашни. Наиболее высокие показатели (95–96%) наблюдаются в Лиманском и Лаганском районах Астраханской области. Районами с максимальными площадями вновь созданных полей являются Лиманский (30.4 тыс. га), Юстинский (11 тыс. га) и Енотаевский (10.7 тыс. га) районы. Созданные массивы локализуются возле существующих каналов и водотоков. Таким образом на 2020 г. к пастбищным землям фактически можно отнести 140 тыс. га, которые обрабатывались в 1980-х. Примерно 62 тыс. га ранее не использованных земель были вовлечены в оборот. А общая площадь пашни в регионе на 2020 г. составила 83.5 тыс. га, при том, что по данным официальной статистики посевная площадь равна 20.3 тыс. га. Это свидетельствует о серьезном недоучете официальной статистикой фактически обрабатываемых земель. В дальнейшем при расчете пастбищных нагрузок площади пашни не учитывались в площади пастбищных земель. Еще 143 тыс. га представлено сорными понижениями и солончаками, на которых отсутствует растительный покров в силу есте-

ственных причин, которые также не учитывались в площади пастбищ.

Всего идентифицирована 1861 животноводческая ферма на 1984–1986 гг. и 1714 ферм на 2020 г., из которых 1275 не изменили своего местоположения с 1984 г. (табл. 1). При этом на территории Калмыкии количество ферм уменьшилось на 312 (сильнее всего в Черноземельском районе – на 184), а в Астраханской области, наоборот, увеличилось на 165. Наглядно это изменение отражено на рис. 1.

В середине 80-х годов прошлого века распределение животноводческих ферм было более равномерным, а к 2020 г. их плотность снизилась в южной части региона и увеличилась вдоль правого берега Волги. Более равномерное покрытие территории животноводческими фермами, использование комбинированных и грубых кормов позволяли в 1980-х при значительно большем поголовье регулировать пастбищные нагрузки. Только необдуманная распашка песчаных земель привела к резкому всплеску опустынивания (Чешев и др., 2018, Kulik et al., 2018, 2020). И в 1980-х и в 2020 г. пространственное распределение ферм не было равномерным, на это указывает индекс ближайшего соседства (Тест Кларка–Эванса): 0.92 и 0.87 соответственно при $p > 0.99$ (табл. 2). За период исследований наблюдаемое среднее расстояние между точками почти не изменилось (около 3 км), а ожидаемое незначительно увеличилось. Случайным можно считать распределение ферм в 2020 г. в Наримановском, Юстинском и Яшкульском районах, в период 1980-х гг. к ним мог быть отнесен Лаганский район. В остальных районах отмечена значимая кластеризация, что

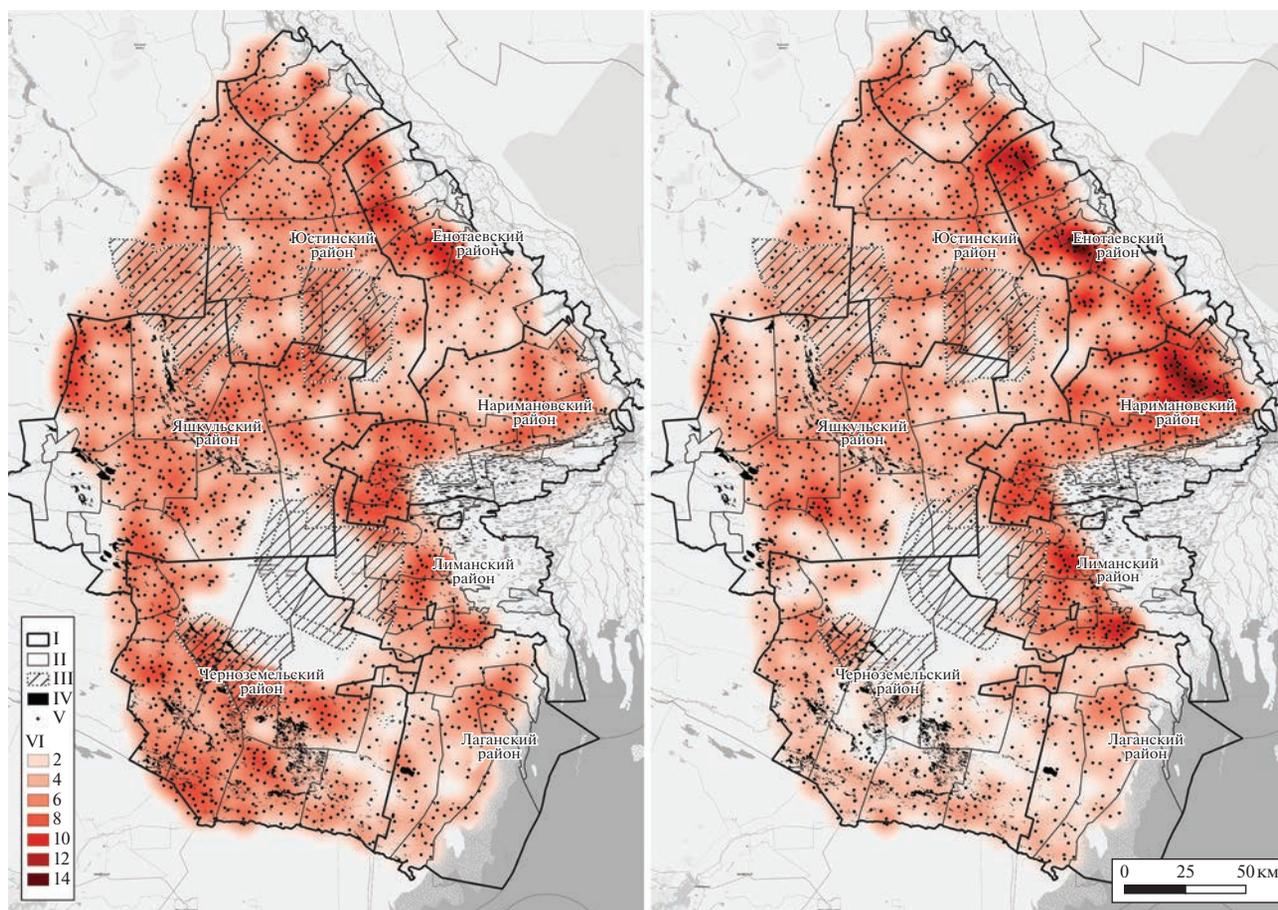


Рис. 1. Сравнение плотности животноводческих ферм в радиусе 10 км в 1984 г. (слева) и в 2020 г. (справа) (I – границы районов, II – границы муниципальных образований, III – границы ООПТ, IV – сорные понижения, солончаки и водоемы, V – животноводческие фермы, VI – плотность животноводческих ферм, шт. в радиусе 10 км).

означает приуроченность большей части объектов к конкретным территориям. Значение наблюдаемого расстояния около 3 км соответствует зоне влияния выпаса вокруг ферм (Кулик и др., 2016; Шинкаренко, 2015; Daga et al., 2020), поэтому участки между соседними фермами могут быть перегружены за счет поголовья нескольких хозяйств. Особенно это заметно на общественных или непоставленных на кадастровый учет землях.

Площадь пастбищ по полигонам Вороного вокруг животноводческих ферм после вычета сорняков, солончаков, пашни и населенных пунктов на 2020 г. равна 3.65 млн га, что достаточно точно согласуется со статистическими данными (3.69 млн га, табл. 1). При этом 78.3% пастбищ расположены в трехкилометровой зоне вокруг животноводческих ферм, следовательно, подвергаются наиболее сильным нагрузкам. В 1980-х гг. площадь пастбищ составляла более 4 млн га, из которых на трехкилометровую зону приходилось 73.7%. Небольшое снижение доли пастбищ в трехкиломет-

ровой окрестности ферм в 2020 г. по сравнению с 1984 г. отмечено только в Лаганском районе (с 65 до 54%), в остальных районах доля пастбищ вблизи ферм выросла. Наиболее сильно в Лиманском районе – с 62 до 95%. Больше 90% пастбищ в трехкилометровой зоне от ферм в Енотаевском, Наримановском, Черноземельском районах. Это является следствием уплотнения распределения животноводческих ферм, результат которого выражается в росте нагрузки на ближайшие к фермам участки. Именно в указанных районах наиболее сильно увеличилась площадь подвижных песков и дефлированных земель в 2020–2021 гг. (Шинкаренко, Барталев, 2020, 2021).

Воздействие выпаса на почвенно-растительный покров зависит от физических свойств почвенного покрова: на суглинистых почвах верхние горизонты уплотняются, а на песчаных почвах, наоборот, разрушаются (Шинкаренко, 2015). Поэтому пастбища на суглинистых почвах более устойчивы к выпасу и дефляции. В регионе ис-

Таблица 2. Показатели анализа близости расположения животноводческих ферм (наблюдаемое и ожидаемое расстояния, индекс ближайшего соседства) в 1984 и 2020 гг.

Район	1984				
	наблюдаемое, м	ожидаемое, м	индекс	Z	p
Енотаевский	2987	3456	0.86	-6.1	0.99
Лаганский	3280	3631	0.90	-1.6	<0.90
Лиманский	3025	3646	0.83	-6.9	0.99
Наримановский	2660	2446	1.09	0.93	<0.90
Черноземельский	2889	3031	0.95	-1.66	0.90
Юстинский	2961	2850	1.04	1.2	<0.90
Яшкульский	2748	2803	0.98	-0.4	<0.90
Всего	2903	3167	0.92	-6.9	0.99
Район	2020				
	наблюдаемое, м	ожидаемое, м	индекс	Z	p
Енотаевский	2544	3235	0.79	-10.4	0.99
Лаганский	3488	4043	0.86	-1.9	0.90
Лиманский	3104	3881	0.80	7.6	0.99
Наримановский	2234	2184	1.02	0.28	<0.90
Черноземельский	3487	3696	0.94	-1.66	0.90
Юстинский	3043	3084	0.99	-0.4	<0.90
Яшкульский	3217	3103	1.04	0.73	<0.90
Всего	2876	3312	0.87	-10.4	0.99

Таблица 3. Площади пастбищ на разных почвообразующих породах в зависимости от удаленности от животноводческих ферм

Почвообразующие породы	Площадь пастбищ, тыс. га								Количество ферм, шт.
	радиус, м							Всего	
	500	1000	1500	2000	2500	3000	>3000		
1984									
Глинистые и тяжелосуглинистые	2.9	8.5	13.0	16.2	16.9	13.9	16.2	87.6	37
Среднесуглинистые	14.7	44.0	69.7	81.4	72.5	52.6	45.4	380.3	196
Легкосуглинистые	32.9	96.6	149.4	178.0	166.0	129.3	135.7	887.9	431
Супесчаные	54.6	160.5	244.7	273.9	241.6	176.0	265.5	1416.8	702
Песчаные	21.6	63.5	100.3	123.4	122.4	101.7	330.1	862.9	286
Пески	16.0	46.2	71.1	83.2	78.1	66.2	126.0	486.6	209
Среднее	142.8	419.1	648.2	756.1	697.5	539.7	918.8	4122.2	1861
2020									
Глинистые и тяжелосуглинистые	2.5	7.4	11.4	14.0	15.0	14.4	13.6	78.2	32
Среднесуглинистые	8.9	26.5	42.2	53.7	57.8	55.9	127.7	372.6	116
Легкосуглинистые	29.1	85.4	132.0	159.8	156.7	129.5	85.3	777.7	376
Супесчаные	47.3	137.4	208.4	239.5	227.0	183.1	152.4	1195.0	617
Песчаные	22.3	63.9	98.5	117.0	113.6	95.9	243.9	755.2	299
Пески	20.4	58.0	85.2	91.0	75.2	56.9	88.2	474.9	274
Среднее	130.5	378.6	577.6	675.0	645.3	535.6	711.1	3653.7	1714

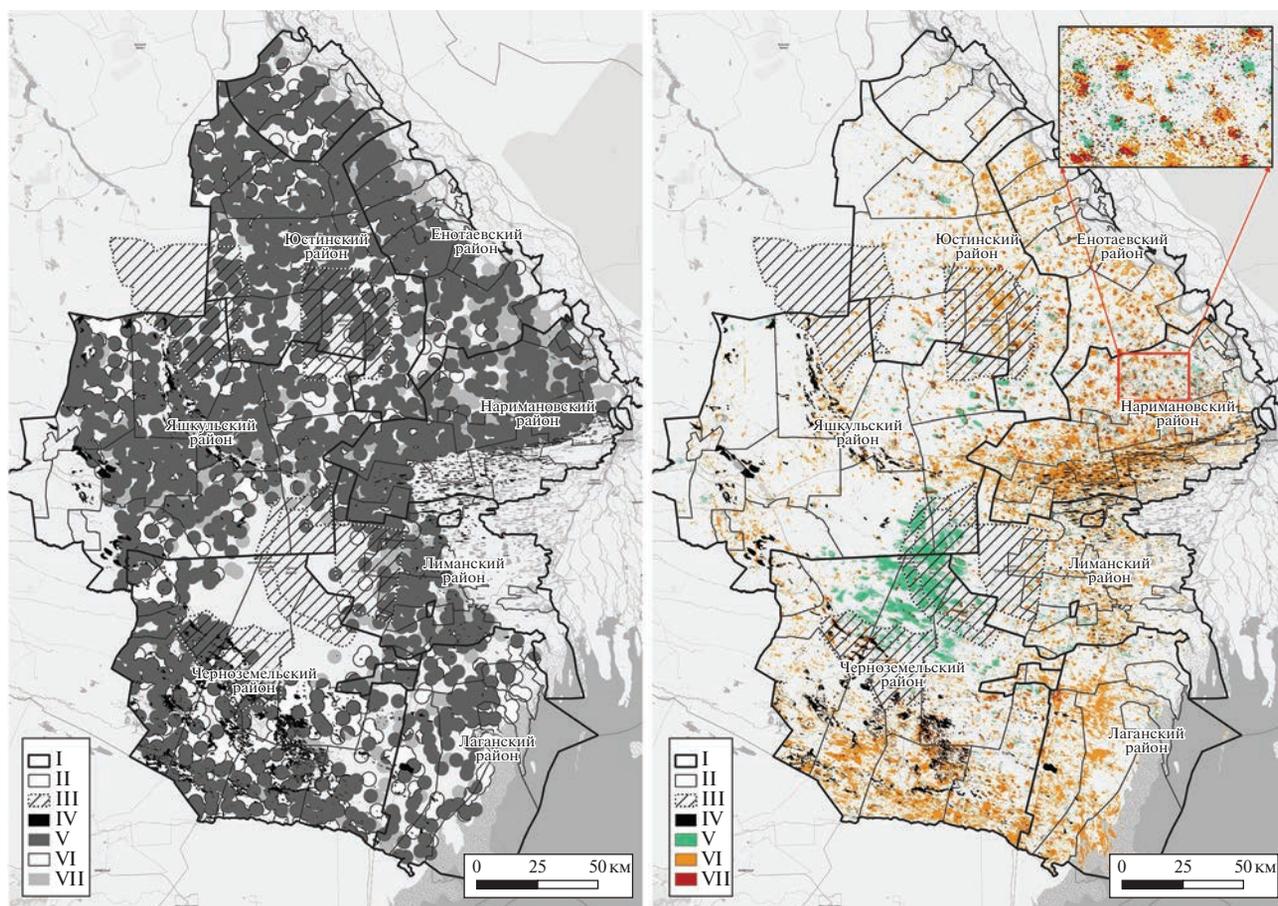


Рис. 2. Сравнение площадей пастбищ в трехкилометровом радиусе от ферм (слева; I – границы районов, II – границы муниципальных образований, III – границы ООПТ, IV – соровые понижения, солончаки и водоемы, V – пастбища и в 1984 и в 2020 гг., VI – только 1984 г., VII – только 2020 г.) и площадей открытых песков и дефлированных территорий в 1984–1986 и 2020 гг. (справа I – границы районов, II – границы муниципальных образований, III – границы ООПТ, IV – соровые понижения, солончаки и водоемы, V – только в 1986 г., VI – только в 2020 г., VII – в 1986 и 2020 гг., на врезке показан увеличенный фрагмент, выделенный красным прямоугольником).

следований произошло снижение количества животноводческих ферм на глинистых и супесчаных почвах на 225 ферм и отмечен рост на песчаных почвах и песках на 78 ферм (табл. 3). Большая плотность животноводческих ферм на песчаных землях могла бы уменьшить пастбищные нагрузки при снижении поголовья на каждой из ферм, но в реальности этого не происходит, и нагрузка увеличивается. Площадь песчаных пастбищ в радиусе 3 км от ферм практически не изменилась: 66 и 73% в 1984 и 2020 гг. соответственно. Это свидетельствует о том, что произошел локальный рост поголовья на песчаных почвах, при том, что площадь пастбищ существенно не увеличилась.

Новые фермы на песчаных почвах и песках расположены в основном в Наримановском и Лиманском районах (рис. 2), где, как было отмечено выше, большая часть пастбищ расположена в трехкилометровой окрестности ферм. Перемене

наиболее используемых пастбищ на песчаные почвы сказалось и на распространении наиболее деградированных участков: подвижных песков и дефлированных земель (рис. 2). Основные площади открытых песков 1984–1986 гг. в настоящее время восстановлены, здесь функционирует заповедник “Черные земли”, в котором полностью запрещен выпас. Поэтому большая часть опустынивания не связана с процессами, происходившими в 1980-х гг., а вызвана нерациональным использованием пастбищ в первую очередь после 2010 г., что подтверждается данными о начале периода деградации пастбищ (Шинкаренко, 2019).

На суглинистых почвах лишённые растительного покрова участки концентрируются в радиусе 0.5–1 км вокруг ферм (рис. 3а). По мере облегчения гранулометрического состава почв пастбищ участки с открытыми песками проявляются на

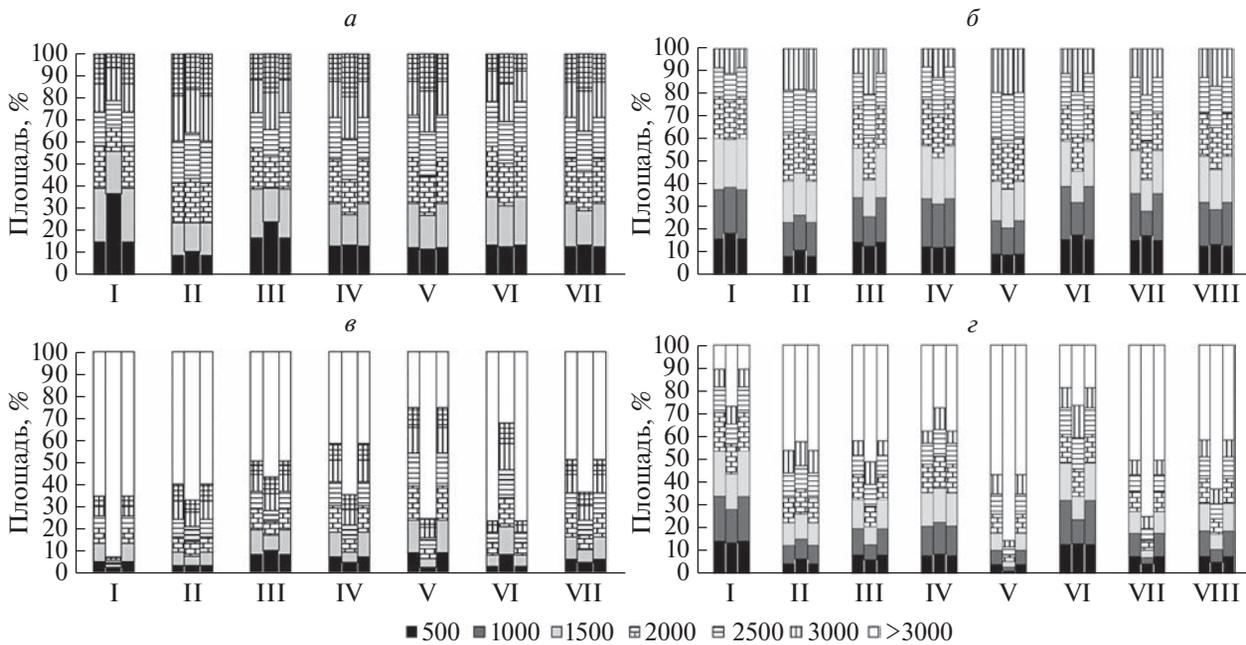


Рис. 3. Распределение площадей открытых песков и дефлированных территорий по удаленности от животноводческих ферм на разных почвах (*а, в* – доля открытых песков на данном типе почвообразующих пород от расположенных в трехкилометровом радиусе (в метрах) и от всей площади открытых песков региона, I – глинистые и тяжелосуглинистые, II – среднесуглинистые, III – легкосуглинистые, IV – супесчаные, V – песчаные, VI – пески, VII – все) и в разрезе муниципальных районов (*б, г* – доля открытых песков в муниципальном районе от расположенных в трехкилометровом радиусе и от всей площади открытых песков региона, I – Енотаевский, II – Лаганский, III – Лиманский, IV – Наримановский, V – Черноземельский, VI – Юстинский, VII – Яшкульский, VIII – все); узкие столбцы – 1986 г., широкие – 2020 г.

все больших расстояниях от ферм. При этом в 1984 г. только 37% всех дефлированных площадей приходилось на трехкилометровый радиус вокруг ферм, к 2020 г. этот показатель увеличился до 51% (рис. 3, *в*). Это связано с тем, что в 1970–80-х гг. основные площади подвижных песков были вызваны распашкой и располагались на месте современного заповедника “Черные земли” (рис. 2), в окрестностях которых к тому времени уже не было мест концентрации скота. К 2020 г. практически во всех исследованных районах увеличилась доля дефлированных земель в трехкилометровых окрестностях ферм (рис. 3, *б, в*). Это стало результатом нерационального использования пастбищ и превышения допустимых нагрузок скота при выпасе.

В 1980-х гг. на территории Калмыкии содержалось около 3.3 млн овец и коз, минимума поголовье достигло к 2000 г. (0.6–0.7 млн голов), на период 2010–2020 гг. по данным статистики поголовье составляло около 2.5 млн голов или 1.4 тыс. гол. овец на одну животноводческую ферму, 2.4 тыс. усл. гол. овец с учетом крупного рогатого скота, лошадей и верблюдов. Согласно Постановлению Правительства Калмыкии (Постановление..., 2006) нормы пастбищных нагрузок

устанавливаются на уровне 0.3–0.5 усл. гол. овец/га. Данное требование в 2007–2020 гг. соблюдалось только на 19.5% территории исследования (рис. 4). При этом участки с наибольшими пастбищными нагрузками на песчаных почвах совпадают с местами локализации открытых песков. Если учитывать кратковременные превышения допустимых пастбищных нагрузок в отдельные годы при максимальном показателе поголовья за 2007–2020 гг., то превышения допустимых величин были на 87% площади пастбищ. На большей части площади превышение составляет 2–3 раза. Особенно сильно несоблюдение нормативов характерно для Лиманского, Наримановского, Юстинского и Яшкульского районов: нормы превышены здесь более чем на 90% площади.

В результате сопоставления пастбищных нагрузок и площадей открытых песков и дефлированных земель в окрестностях животноводческих ферм подтверждено, что пастбищные нагрузки наиболее сильно влияют на участки на легких по гранулометрическому составу почвах (рис. 5). Отмечена значимая сильная корреляционная связь доли открытых песков и как среднесуточных пастбищных нагрузок ($r = 0.82$), так и максимальных за период ($r = 0.88$). Стоит отметить, что даже

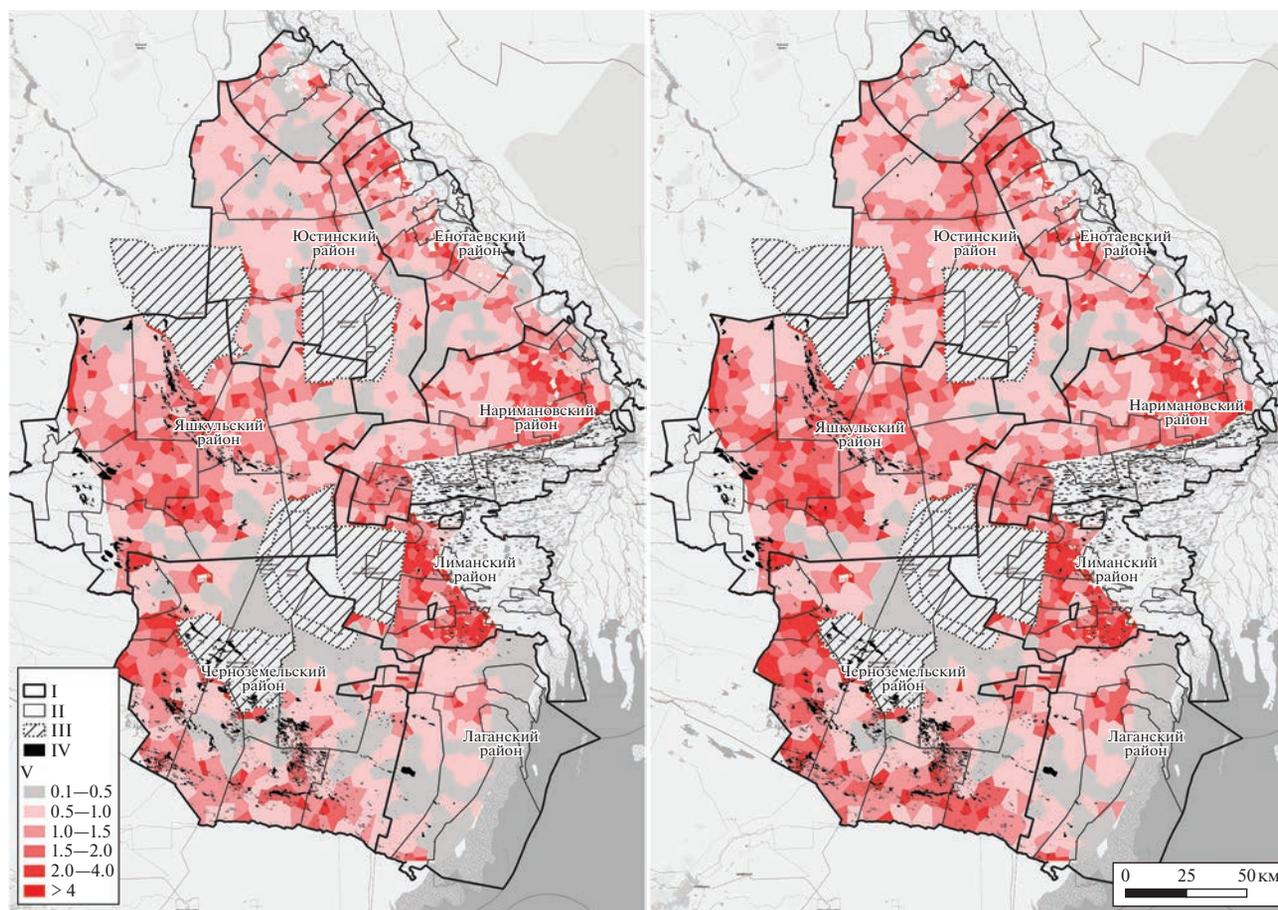


Рис. 4. Пастбищные нагрузки за 2007–2019 гг.: среднеголетние (слева) и максимальные (справа) (I – границы районов, II – границы муниципальных образований, III – границы ООПТ, IV – соровые понижения, солончаки и водоемы, V – пастбищные нагрузки, усл. гол. овец на га).

кратковременные превышения пастбищных нагрузок более 3 усл. гол. овец/га на супесчаных и песчаных почвах приводят к резкому увеличению площади лишенных растительного покрова участков (рис. 5, а, 5, б). Безусловно, кроме непосредственно пастбищных нагрузок на площадь подвижных песков влияет интенсивность эоловых процессов, обусловленных синоптической ситуацией и ветровой нагрузкой. Но как показали предыдущие исследования (Шинкаренко, 2019), выпас скота препятствует зарастанию и закреплению существующих песчаных массивов. Пастбищные нагрузки проявляются не только в уничтожении растительного покрова, но и в разрыхлении связанных песков, что снижает их устойчивость ветровому воздействию (Kulik et al., 2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования Земли позволяет выявить пространственную структуру антропоген-

ных нагрузок на ландшафты. Животноводческие фермы обладают достаточно четкими дешифровочными признаками, поэтому могут быть достоверно картографированы. Закономерности их пространственного распределения могут служить основой для анализа величин пастбищных нагрузок. В совокупности с данными о поголовье скота становится возможным расчет величин пастбищных нагрузок, а геоинформационная обработка позволяет включить в анализ данные о почвенном покрове, продуктивности земель, их приуроченности к единицам административно-территориального деления. Дальнейшие исследования могут быть направлены на исследование изменений растительного покрова на разном удалении от животноводческих ферм в зависимости от пастбищных нагрузок и почвенно-растительных условий с применением как натуральных, так и дистанционных методов.

Установлено, что к 2020 г. по сравнению с 1980-ми гг. уменьшилось количество животно-

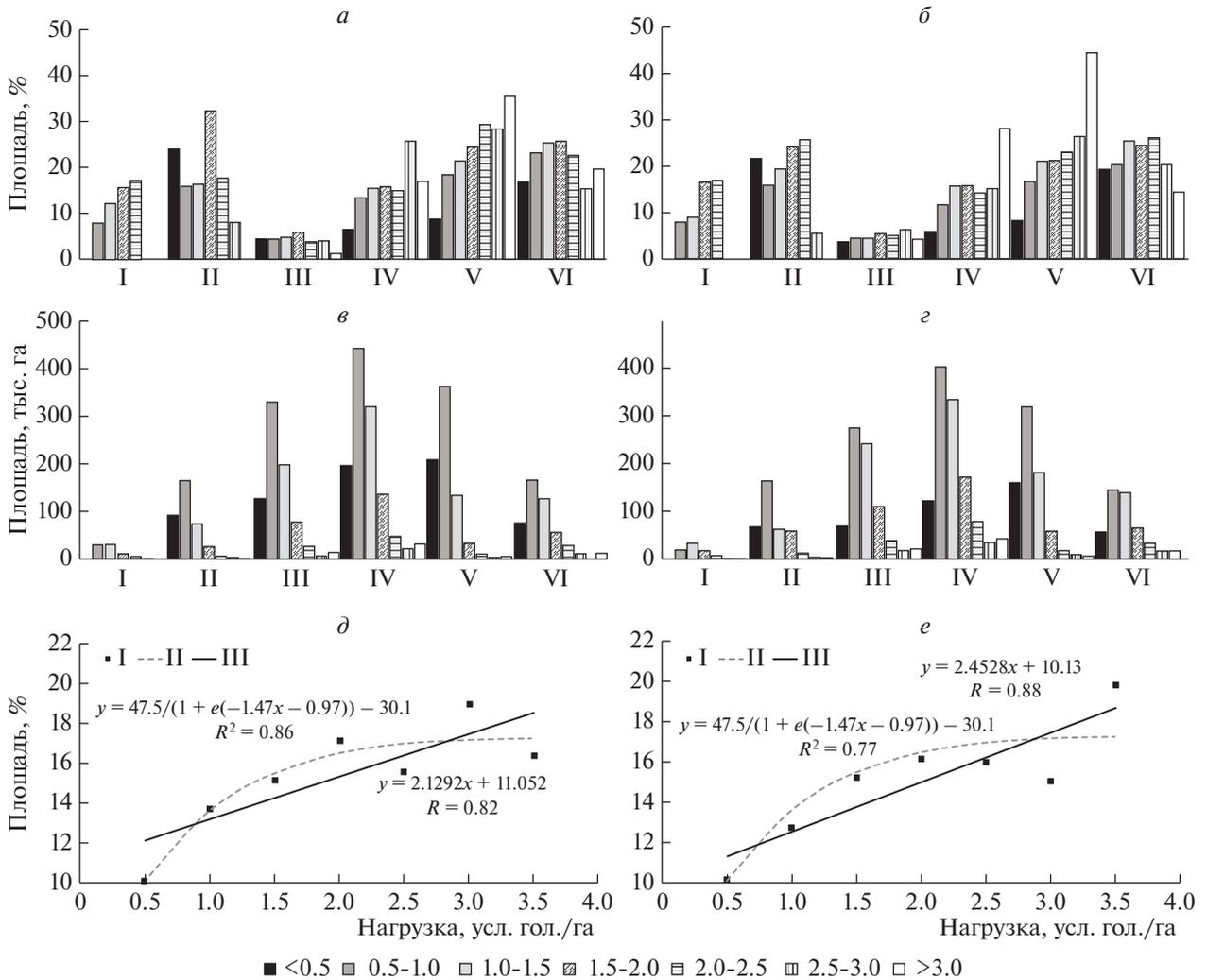


Рис. 5. Распределение площадей открытых песков и дефлированных территорий по пастбищам с разной нагрузкой (усл. гол. овец/га, *a* – среднееголетняя нагрузка, *б* – максимальная нагрузка) и площадей пастбищ с разной нагрузкой (усл. гол. овец/га, *в* – среднееголетняя нагрузка, *г* – максимальная нагрузка; I – глинистые и тяжелосуглинистые, II – среднесуглинистые, III – легкосуглинистые, IV – супесчаные, V – песчаные, VI – пески) и связь доли открытых песков и дефлированных площадей с пастбищными нагрузками (*д*, *е* – среднееголетняя и максимальная нагрузка, I – фактические данные, II – аппроксимация сигмидой, III – линейная регрессия).

водческих ферм на суглинистых почвах, а на песчаных почвах и песках, наоборот, увеличилось. При том, что площадь пастбищ осталась практически неизменной. Это привело к росту пастбищных нагрузок на легких по гранулометрическому составу почвах. Более чем на 80% территории пастбищ превышены допустимые нагрузки выпаса скота. Результатом этого стала активизация процессов опустынивания в регионе. Засуха 2020 г. привела к катастрофическому опустыниванию, пыльным бурям и многократному росту площадей открытых песков и дефлированных территорий.

Почти 90% пастбищ расположены в трехкилометровом радиусе вокруг ферм и населенных пунктов, т.е. наиболее подвержены антропоген-

ному воздействию. Соответственно в регионе нет площадей, за счет которых можно было бы снизить нагрузки при существующей численности поголовья. Только регулирование выпаса, соблюдение пастбищеоборотов, изменение структуры поголовья (переход от овец к лошадям, верблюдам и крупному рогатому скоту), фитомелиоративные мероприятия позволят стабилизировать состояние пастбищных ландшафтов Северо-Западного Прикаспия.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-35-60007 и в рамках

темы ИКИ РАН “Мониторинг” (госрегистрация № 122042500031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бананова В.А., Лазарева В.Г.* 2014. Тенденции изменения ботанического разнообразия под влиянием опустынивания в республике Калмыкия // *Аридные экосистемы*. Т. 20. № 2(59). С. 87–96.
- Васильченко А.А., Выприцкий А.А.* Методика идентификации антропогенных изменений аридных ландшафтов // *Грани познания*. 2020. № 5(70). С. 75–81.
- Горяев И.А.* Галофитные полынные на Прикаспийской низменности (в пределах Калмыкии) // *Ботанический журнал*. 2019. Т. 104. № 1. С. 93–106.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б.* Тенденция опустынивания Северо-Западного Прикаспия по MODIS-данным // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 2. С. 217–225.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* 2020. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // *Изв. Российской академии наук. Серия географическая*. № 2. С. 207–217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Кулик К.Н., Есмагулова Б.Ж., Кошелева О.Ю., Мушаева К.Б., Шинкаренко С.С.* Изменение фитоценозов Волго-Уральского междуречья под влиянием пастбищных нагрузок // *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология*. 2016. № 4. С. 25–32.
- Луян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашицкий А.В., Балаилов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП “ИКИ-Мониторинг”) // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
- Национальный атлас почв Российской Федерации. М: Астрель: Аст. 2011. 632 с.
- Национальный доклад. “Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. Эдельгериева Р.С.-Х. 2021. Т. 3. 700 с.
- Национальный доклад. “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. Эдельгериева Р.С.-Х. 2019. Т. 2. 476 с.
- Почвенная карта РСФСР. 1988. Масштаб 1: 2.5 млн / Под ред. В.М. Фридрианда. М.: ГУГК.
- Рыбашлык Л.П., Беляев А.И., Пугачёва А.М.* Мониторинг сукцессионных изменений пастбищных фитоценозов в “потухших” очагах дефляции Северо-Западного Прикаспия // *Юг России: экология, развитие*. 2019. Т. 14. № 4. С. 78–85.
- Чешев А.С., Бакинова Т.И., Шевченко Н.А.* Социально-экономические основы рационального использова-
- ния земель в условиях западного Прикаспия // *Экономика и экология территориальных образований*. 2018. Т. 2. № 4. С. 6–16. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2018-2-4-6-16>
- Шинкаренко С.С.* Пространственно-временная динамика опустынивания на Черных землях // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 6. С. 155–168.
- Шинкаренко С.С.* Оценка влияния выпаса на ландшафты Приэльтона // *Научное обозрение*. 2015. № 14. С. 10–15.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Оценка площади опустынивания на юге европейской части России в 2021 г. // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 291–297. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297>
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* Последствия пыльных бурь 2020 года на юге европейской части России // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 7. С. 270–275.
- Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А.Н.* Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // *Изв. Российской академии наук. Серия географическая*. 2022. Т. 86. № 1. С. 122–133. <https://doi.org/10.31857/S2587556622010113>
- Шинкаренко С.С., Дорошенко В.В., Берденгалиева А.Н., Комарова И.А.* Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2021а. Т. 18. № 1. С. 149–164. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164>
- Шинкаренко С.С., Иванов Н.М., Берденгалиева А.Н.* Пространственно-временная динамика выгоревших площадей на федеральных ООПТ юго-востока Европейской России // *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. 2021б. Т. 6. № 3. С. 23–44. <https://doi.org/10.24189/ncr.2021.035>
- Шинкаренко С.С., Ткаченко Н.А., Барталев С.А., Юфре-рев В.Г., Кулик К.Н.* Пыльные бури на юге европейской части России в сентябре-октябре 2020 года // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 5. С. 291–296.
- Электронный ресурс <https://www.gks.ru/db-scripts/munst/munst.htm>.
- Электронный ресурс <http://egrpr.soil.msu.ru/download.php>.
- Cherepanov S.K.* Vascular plants of Russia and adjacent states (the former USSR). Cambridge University Press, Cambridge. 2007. 517 p.
- Dara A., Baumann M., Freitag M., Holzel N., Hostert P., Kamp J., Muller D., Prishchepov A.V., Kuemmerle T.* Annual Landsat time series reveal post-Soviet changes in grazing pressure // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 239. P. 111667. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111667>
- Dubinina M., Lushchikina A., Radeloff V.C.* Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? // *Ecosystems*. 2011. V. 14. P. 547–562. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9427-9>

- Dubin M., Potapov P., Lushchikina A., Radeloff V.C.* Reconstructing long time series of burned areas in arid grasslands of southern Russia by satellite remote sensing // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 1638–1648. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.010>
- Karimova T.Y., Lushchikina A.A., Neronov V.M.* Saiga Populations of Russia and Kazakhstan: Current Status and Retrospective Analysis of Some Biological Parameters // *Arid Ecosystems*. 2021. V. 11. № 2. P. 164–172. <https://doi.org/10.1134/S2079096121020074>
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S.* On the 30th anniversary of the “General plan to combat desertification of Black lands and Kizlyar pastures” // *Arid ecosystems*. 2018. V. 8. № 1. P. 5–20. <https://doi.org/10.1134/S2079096118010067>
- Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S.* // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. № 2. P. 98–105. <https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
- Lazareva V. G., Bananova V. A., Van Zung N.* Dynamics of Modern Vegetation for Pasture Use in the Northwestern Pre-Caspian Region // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. № 4. P. 276–283. <https://doi.org/10.1134/S2079096120040137>
- Loupiat E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 1. P. 77. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>
- Mitchell A.* The ESRI Guide to GIS Analysis. 2005. V. 2: Spatial Measurements and Statistics. ESRI Press. 252 p.
- Radochinskaya L.P., Kladiyev A.K., Rybashlykova L.P.* Production potential of restored pastures of the Northwestern Caspian // *Arid ecosystems*. 2019. V. 9. № 1. P. 51–58. <https://doi.org/10.1134/S2079096119010086>
- Trofimov I. A., Trofimova L. S., Yakovleva E. P.* Remote indicators of desertification // *Arid Ecosystems*. 2015. V. 5. № 1. P. 24–27. <https://doi.org/10.1134/S2079096115010102>
- Vlasenko M.V., Kulik A.K., Salugin A.N.* Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland // *Arid Ecosystems*. 2019. V. 9. № 4. P. 273–281. <https://doi.org/10.1134/S2079096119040097>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Bazha S.N., Syrtypova S.H.D.* Trends in Livestock Numbers and Spectral Properties of the Pasture Surface: Case Study of the Middle Gobi Aimag of Mongolia // *Arid Ecosystems*. 2018. V. 8. № 3. P. 153–160. <https://doi.org/10.1134/S2079096118030095>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A., Vinogradova V.V.* Dynamics of Summer Moistening and Biophysical Parameters of Arid Pastures in the European Part of Russia in 2000–2014 // *Arid Ecosystems*. 2016. V. 6. № 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1134/S2079096116010078>

Analysis of Anthropogenic Influence on Desertification Processes in the Northern Caspian Region According to Satellite Data

S. S. Shinkarenko^{1, 2}, A. A. Vypritskiy³, A. A. Vasilchenko³, and A. N. Berdengalieva³

¹Volgograd State University, Volgograd, Russia

²Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

³Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

Pasture loads are one of the key anthropogenic factors in the dynamics of the state of vegetation and soil cover of arid landscapes. The purpose of this study is to establish the spatial distribution of pasture loads in the Black Lands region using remote sensing data from space, geoinformation technologies and statistical data. In this work, mapping of livestock farms, sheepfolds and other places of concentration of livestock for 1984–1986 and 2020 was carried out. Both periods are characterized by a surge in desertification processes and a sharp increase in the areas of open sands and deflated lands. The areas of pastures with different loads during cattle grazing are established, the patterns of spatial distribution of mobile sands depending on the soil-forming rocks and distance from livestock farms are also determined. In recent years, compared with 1984–1986, the density of farms on sandy soils has increased, which led to overgrazing, destruction of vegetation and activation of Aeolian processes. Approximately 80% of pastures exceeded the permissible grazing standards, and 90% of pastures are located in a 3 km zone around the places of concentration of livestock. The results obtained can be used to regulate pasture loads in the region to prevent desertification of landscapes.

Keywords: desertification, remote sensing, Landsat, Kalmykia, Astrakhan region, Black Lands

REFERENCES

- Bananova V.A., Lazareva V.G.* Tendentsii izmeneniya botanicheskogo raznoobraziya pod vliyaniem opustynivaniya v respublike Kalmykiya [Trends in the change of botanical diversity under the influence of desertification in the Republic of Kalmykia] // *Aridnye ekosistemy*. 2014. V. 20. № 2 (59). P. 87–96. (In Russian).
- Cherepanov S.K.* Vascular plants of Russia and adjacent states (the former USSR). Cambridge University Press, Cambridge. 2007. 517 p.

- Cheshev A.S., Bakinova T.I., Shevchenko N.A.* Sotsial'no-ekonomicheskie osnovy ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel' v usloviyakh zapadnogo Prikaspiya [Socio-economic foundations of rational land use in the conditions of the Western Caspian Sea] // *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy*. 2018. V. 2. № 4. P. 6–16. (In Russian).
- Dara A., Baumann M., Freitag M., Holzel N., Hostert P., Kamp J., Muller D., Prishchepov A.V., Kuemmerle T.* Annual Landsat time series reveal post-Soviet changes in grazing pressure // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 239. P. 111667.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111667>
Digital source <http://egrpr.soil.msu.ru/download.php>.
- Digital source <https://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst.htm>.
- Dubinina M., Lushchikina A., Radeloff V.C.* Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? // *Ecosystems*. 2011. V. 14. P. 547–562.
<https://doi.org/10.1007/s10021-011-9427-9>
- Dubinina M., Potapov P., Lushchikina A., Radeloff V.C.* Reconstructing long time series of burned areas in arid grasslands of southern Russia by satellite remote sensing // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 1638–1648.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.010>
- Goryaev I.A.* Galofitnye polynniki na Prikaspiiskoi nizmenosti (v predelakh Kalmykii) [Halophytic sagebrush on the Caspian lowland (within Kalmykia)] // *Botanicheskii zhurnal*. 2019. V. 104. № 1. P. 93–106. (in Russian).
- Karimova T.Y., Lushchikina A.A., Neronov V.M.* Saiga Populations of Russia and Kazakhstan: Current Status and Retrospective Analysis of Some Biological Parameters // *Arid Ecosystems*. 2021. V. 11. № 2. P. 164–172.
<https://doi.org/10.1134/S2079096121020074>
- Kulik K.N., Esmagulova B.Zh., Kosheleva O.Yu., Mushaeva K.B., Shinkarenko S.S.* Izmenenie fitotsenozov Volgo-Ural'skogo mezhdurech'ya pod vliyaniem pastbishchnykh nagruzok [Changes in phytocenoses of the Volga-Ural interfluvium under the influence of pasture loads] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2016. № 4. P. 25–32. (in Russian).
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S.* On the 30th anniversary of the “General plan to combat desertification of Black lands and Kizlyar pastures” // *Arid Ecosystems*. 2018. V. 8. № 1. P. 5–20.
<https://doi.org/10.1134/S2079096118010067>
- Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S.* // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. № 2. P. 98–105.
<https://doi.org/10.1134/S2079096120020080>
- Lazareva V.G., Bananova V.A., Van Zung N.* Dynamics of Modern Vegetation for Pasture Use in the Northwestern Pre-Caspian Region // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. № 4. P. 276–283.
<https://doi.org/10.1134/S2079096120040137>
- Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I.* Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. № 1. P. 77.
<https://doi.org/10.3390/rs14010077>
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A.* Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP “IKI-Monitoring”) [Experience in the operation and development of the center for the collective use of systems for archiving, processing and analysis of satellite data (CCP “IKI-Monitoring”)] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 23. P. 151–170. (In Russian).
- Mitchell A.* The ESRI Guide to GIS Analysis. 2005. V. 2: Spatial Measurements and Statistics. ESRI Press. 252 p.
- Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii [National Atlas of Soils of the Russian Federation]. 2011. M.: Astrel': Ast. 632 p. (In Russian).
- Natsional'nyi doklad. “Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnye meropriyatiya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)” [Global climate and soil cover of Russia: drought manifestations, prevention, control measures, elimination of consequences and adaptation measures (agriculture and forestry)] / Eds Edel'geriev R.S.-Kh. 2021. V. 3. 700 p. (in Russian).
- Natsional'nyi doklad. “Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)” [Global climate and soil cover of Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)]. / Eds Edel'geriev R.S.-Kh. 2019. V. 2. 476 p. (in Russian).
- Pochvennaya karta RSFSR [Soil map of the RSFSR]. 1988. 1: 2500000 / Eds V.M. Fridland. M.: GUGK. (in Russian).
- Radochinskaya L.P., Kladiyev A.K., Rybashlykova L.P.* Production potential of restored pastures of the Northwestern Caspian // *Arid ecosystems*. 2019. V. 9. № 1. P. 51–58.
<https://doi.org/10.1134/S2079096119010086>
- Rybashlykova L.P., Belyaev A.I., Pugacheva A.M.* Monitoring suksessionnykh izmeneniy pastbishchnykh fitotsenozov v “potukhshikh” ochagakh deflyatsii Severo-Zapadnogo Prikaspiya [Monitoring of successional changes in pasture phytocenoses in “extinct” deflation foci of the North-Western Caspian] // *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*. 2019. V. 14. № 4. P. 78–85. (In Russian).
- Shinkarenko S.S.* Otsenka vliyaniya vypasa na landshafty Priel'ton'ya [Assessment of the impact of grazing on the landscapes of the Elton region] // *Nauchnoye obozrenie*. № 14. P. 10–15. (In Russian).
- Shinkarenko S.S.* Prostranstvenno-vremennaya dinamika opustynivaniya na Chernykh zemlyakh [Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 16. № 6. P. 155–168. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A.* Otsenka ploshchadi opustynivaniya na yuge evropeiskoi chasti Rossii v 2021 g. [Assessment of desertification area in the south of the European part of Russia in 2021] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 18. № 4. P. 291–297. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Bartalev S.A.* Posledstviya pyl'nykh bur' 2020 goda na yuge evropeiskoi chasti Rossii [Consequences of dust storms in the south of the European part of Russia in September–October 2020] // *Sovremennye problemy dis-*

- tancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. № 7. P. 270–275. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A.N.* Dinamika ploshchadi garei v zonal'nykh landshaftakh yugo-vostoka evropeiskoi chasti Rossii [Burned areas dynamics in zonal landscapes of the south-east of the european part of russia] // *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2022. V. 86. № 1. P. 122–133. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Doroshenko V.V., Berdengalieva A.N., Komarova I.A.* Dinamika gorimosti aridnykh landshaftov Rossii i sopredel'nykh territorii po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniiya [Dynamics of arid landscapes burning in Russia and adjacent territories based on active fire data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. V. 18. № 1. P. 149–164. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Ivanov N.M., Berdengalieva A.N.* Prostranstvenno-vremennaya dinamika vygorevshikh ploshchadei na federal'nykh OOPT yugo-vostoka Evropeiskoi Rossii [Spatio-temporal dynamics of burnt areas in federal protected areas of South-East of the European part of Russia] // *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*. 2021. V. 6. № 3. P. 23–44. (In Russian).
- Shinkarenko S.S., Tkachenko N.A., Bartalev S.A., Yuferev V.G., Kulik K.N.* Pyl'nye buri na yuge evropeiskoi chasti Rossii v sentyabre-oktyabre 2020 goda [Dust storms in the south of the European part of Russia in September–October 2020] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. № 5. P. 291–296. (In Russian).
- Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P.* Remote indicators of desertification // *Arid Ecosystems*. 2015. V. 5. № 1. P. 24–27. <https://doi.org/10.1134/S2079096115010102>
- Vasil'chenko A.A., Vypritskii A.A.* Metodika identifikatsii antropogennykh izmenenii aridnykh landshaftov [Method of identification of anthropogenic changes in arid landscapes] // *Grani poznaniya*. 2020. № 5(70). P. 75–81. (In Russian).
- Vlasenko M.V., Kulik A.K., Salugin A.N.* Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland // *Arid Ecosystems*. 2019. V. 9. № 4. P. 273–281. <https://doi.org/10.1134/S2079096119040097>
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B.* Aridizatsiya zasushlivykh zemel' Evropeiskoi chasti Rossii i svyaz' s zasukhami [Aridization of the arid lands of the European part of Russia and the connection with droughts] // *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2020. № 2. P. 207–217. (In Russian).
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Bazha S.N., Syrtypova S.H.D.* Trends in Livestock Numbers and Spectral Properties of the Pasture Surface: Case Study of the Middle Gobi Aimag of Mongolia // *Arid Ecosystems*. 2018. V. 8. № 3. P. 153–160. <https://doi.org/10.1134/S2079096118030095>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A., Vinogradova V.V.* Dynamics of Summer Moistening and Biophysical Parameters of Arid Pastures in the European Part of Russia in 2000–2014 // *Arid Ecosystems*. 2016. V. 6. № 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1134/S2079096116010078>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B.* Tendentsiya opustynivaniya Severo-Zapadnogo Prikaspiya po MODIS-dannym [The trend of desertification of the North-Western Caspian Sea according to MODIS data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. V. 8. № 2. P. 217–225. (In Russian).

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЭРОЗИОННО-ТЕРМОКАРСТОВЫХ РАВНИН НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

© 2023 г. А. С. Викторов^а, *, В. Н. Капралова^а, Т. В. Орлов^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2022 г.

Статья посвящена задаче разработки нового варианта модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин на основе широкого использования материалов космической съемки. С помощью использования данных дистанционного зондирования был разработан вариант модели, учитывающий разный ход термокарстовых процессов на водораздельной поверхности и пониженной поверхности хасыреев. Данная модель была эмпирически проверена на восьми выбранных ключевых участках, которые расположены в различных физико-географических, климатических и геокриологических условиях. Проверка проводилась на основе использования материалов космической съемки высокого разрешения. Разработанный вариант модели подтверждается статистическим анализом распределений площадей озер в пределах водораздельной поверхности и пониженной поверхности хасыреев и показывает существование динамического равновесия в возникновении, росте и спуске термокарстовых озер. Анализ показывает, что морфологическая структура эрозионно-термокарстовых равнин эволюционно меняется, сокращая площадь основной водораздельной поверхности по зависимости, близкой к экспоненте; конкретный вид зависимости зависит прежде всего от отношения плотности генерации озер и плотности расположения истоков эрозионных форм. Использование предлагаемого нового варианта модели позволяет уточнить оценку риска поражения линейных сооружений, пересекающих эрозионно-термокарстовые равнины.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, эрозионно-термокарстовые равнины, математические модели морфологических структур, данные дистанционного зондирования

DOI: 10.31857/S0205961423030089, EDN: TYREGE

ВВЕДЕНИЕ

Эрозионно-термокарстовые равнины представляют собой широко распространенный ландшафт криолитозоны. Именно на его территории пролегает значительная часть трубопроводных систем, основной угрозой которых являются термокарстовые процессы. Изменение морфологической структуры ландшафтов криолитозоны рассматривалось в сравнительно небольшом числе работ (Кравцова, Быстрова, 2009; Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013; Grosse et al., 2016, Morgenstern et al., 2011 и др.). При этом практически не разделялось рассмотрение озерно-термокарстовых и эрозионно-термокарстовых равнин. Созданные модели развития эрозионно-термокарстовых равнин для прогноза является актуальной научной и практической задачей, особенно в условиях климатических изменений.

В более ранних исследованиях была разработана модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин. Исходно были по-

лучены данные говорящие в пользу синхронного старта термокарстовых процессов (Викторов и др., 2019), но более поздние исследования на значительном числе участков, показали преобладание варианта с асинхронным стартом (Викторов и др., 2020; Виктор и др., 2021).

Вместе с тем предложенная модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин имела определенные недостатки. Эти недостатки были связаны прежде всего с предположением об одинаковом ходе процессов возникновения, роста и спуска термокарстовых озер, возникших на основной поверхности, и озер, возникших на поверхности хасыреев.

Целью настоящей статьи является изложение результатов разработки нового варианта модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин на основе использования материалов космической съемки.

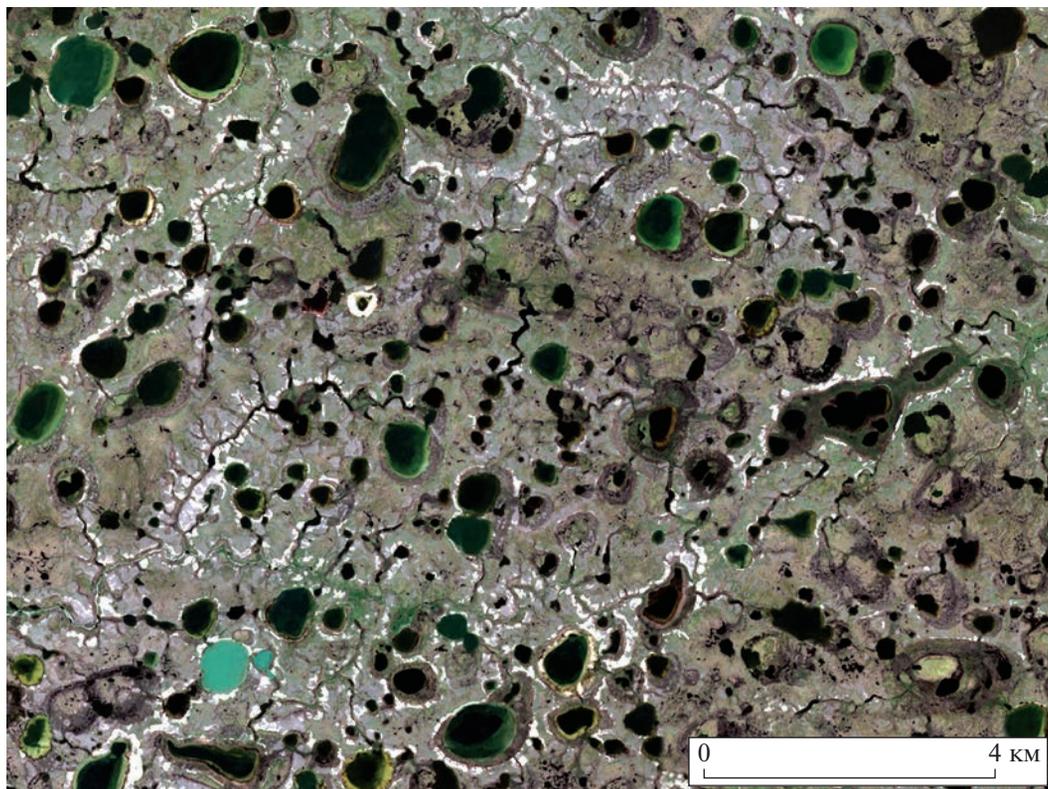


Рис. 1. Типичное изображение участка эрозионно-термокарстовых равнин на материалах космической съемки.

МЕТОДИКА

Эрозионно-термокарстовые равнины представляют собой волнистые или слабохолмистые поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью с вкраплением термокарстовых озер и хасыреев и развитием эрозионных форм; озера и хасыреи имеют как правило округлые очертания и в беспорядке расположены в пределах равнины.

Типичное изображение эрозионно-термокарстовых равнин на материалах космической съемки приведено на рис. 1.

Развитие эрозионно-термокарстовых равнин в рассматриваемом варианте асинхронного старта исследовалось разными авторами (Вельмина, 1957; Суходровский, 1973; Павлов, 1965; Гравис, 1966 и др.) и происходит под воздействием комплекса разнонаправленных процессов:

- Возникновение первичных термокарстовых понижений с водой.
- Рост понижений (озер) под действием термоабрационных процессов.
- Спуск озер эрозионными процессами с остановкой их роста и превращением в хасыреи.

Дополнительную сложность придает то, что новые термокарстовые понижения не возникают в пределах площади существующих озер, поэтому

чем больше заозеренность, тем меньше в этот момент генерируется новых первичных понижений.

Анализ материалов космических съемок показал, что в пределах эрозионно-термокарстовых равнин можно выделить два главных элемента:

- волнистые или слабохолмистые водораздельные поверхности с тундровой или лесотундровой растительностью (“основная поверхность” — составляющая 1);
- пониженные поверхности, занятые хасыреями, которые нередко сливаются друг с другом, образуя массивы (составляющая 2).

В пределах основной поверхности происходит появление и рост термокарстовых озер, которые при спуске эрозией превращаются в хасыреи.

Как показал анализ материалов космических съемок, в пределах площади хасыреев и их массивов, также развиты озера, большая часть которых является вторичными, возникшими за счет развития термокарстового процесса после появления хасырея. Эти озера отличаются четкими резкими очертаниями, часто округлой формой, несовпадением центра озера и центра хасырея. Кроме того, в хасыреях встречаются остаточные озера, сформировавшиеся в результате незавершенного спуска водной массы озера в процессе превращения в хасырей (рис. 2) Остаточные озера в хасыреях, напротив, характеризуются расплыв-



Рис. 2. Изображения различных типов термокарстовых озер на материалах космической съемки: озер на основной поверхности (1) и вторичных озер на поверхности хасыреев (2).

чатыми неправильными очертаниями и нерезкими границами, как правило, расположением в центральной части или по периферии; они не рассматриваются в настоящем исследовании.

Условия развития термокарстовых и эрозионных процессов в пределах водораздельных поверхностей и пониженных поверхностей с развитием хасыреев представляются различными.

Методика исследований включала:

- Разработку нового варианта математической модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин и ее математический анализ.

- Выбор ключевых участков для эмпирической проверки модели и получение материалов космической съемки.

- Выделение и измерение площадей термокарстовых озер на ключевых участках и формирование выборок по принадлежности основной поверхности и поверхности хасыреев (вторичные озера).

- Проверку допущения о разных условиях развития термокарстовых и эрозионных процессов в пределах водораздельных поверхностей и пониженных поверхностей с развитием хасыреев с использованием материалов космической съемки на основе критерия Смирнова.

Таблица 1. Параметры данных дистанционного зондирования Земли

Участок	Источник данных	Дата съемки	Разрешение, м/пикс
19	WorldView2	28.07.2013	0.5
20	WorldView2	24.08.2018	0.5
21	WorldView2	10.07.2013	0.5
22	Sentinel-2	11.08.2018	10
25	SPOT 6	03.08.2019	1.5
28	WorldView2	10.07.2013	0.5
30	SPOT 7	17.09.2017	1.5
40	SPOT 7	07.08.2015	1.5

- Проверку вывода о наличии динамического равновесия в ходе термокарстовых и эрозионных процессов на различных поверхностях эрозионно-термокарстовых равнин с использованием материалов космической съемки на основе критерия Пирсона.

- Комплексный анализ результатов моделирования.

При исследовании были использованы космические снимки с разрешением 0.5–10 м (WorldView2, Spot6, Spot7, Sentinel-2), снятые в июле-сентябре 2013–2019 гг. Снимки получены как из открытых источников (Google Earth, Yandex Maps, Bing) так и специально приобретенные (ScanEx R&D Center). Описание космических снимков приведено в табл. 1.

Выделение и измерение площадей термокарстовых озер на ключевых участках выполнялось с использованием геоинформационных систем ARCGIS и QGIS. Использовались как автоматические модули, так и ручная интерпретация данных для картирования озер, включая специальный анализ, чтобы избежать ошибок интерпретации. В исследовании отбирались озера на основной поверхности и вторичные озера в хасыреях. Небольшие остаточные водоемы с неопределенными границами в неполностью дренированных озерных котловинах были исключены из рассмотрения.

Площадь озер определялась с помощью соответствующего модуля ARCGIS. Оценка средней погрешности измерения площади озер определялась аналитическим способом на основе средней площади озера для каждого участка. В связи с контрастностью объекта основная ошибка связана с неверным отнесением пикселей по границе озера, поэтому оценка формировалась как отношение площади, отвечающей пикселям, формирующим периметр озера, к площади озера, принимаемая последнее за круг. В зависимости от средней площади озер на участке и разрешения материалов космической съемки погрешность колеблется в пределах от 0.2% (для участка с боль-

шими озерами и разрешением 0.5 м) до 2.9%, в среднем по всем участкам составляя 1.9%.

Ключевые участки, на которых осуществлялась проверка модели, расположены в различных физико-географических условиях. Типичное изображение ключевого участка эрозионно-термокарстовых равнин на материалах космической съемки приведено на рис. 1.

Ключевые участки представляют собой равнины, сложенные преимущественно морскими и аллювиальными отложениями, представленными песками, супесями, суглинками и алевролитами с развитием различных типов тундр, а также озерно-болотными образованиями (рис. 3).

Анализ развития территории может быть выполнен на основе математической модели морфологической структуры. В основе математической модели положена математическая модель морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в базовом варианте (Викторов, 2006). Однако ее допущения были изменены и адаптированы к рассматриваемым условиям:

1. Возникновения первичных термокарстовых понижений (озер) на основной поверхности и на поверхности хасыреев за непересекающиеся отрезки времени (Δt) и на непересекающихся площадках (Δs) являются независимыми случайными событиями; вероятность возникновения понижения зависит только от величины отрезка и площадки¹.

$$p_1 = \lambda_i \Delta s \Delta t + o(\Delta s \Delta t), \quad i = 0, 1,$$

$$p_k = o(\Delta s \Delta t), \quad k = 2, 3, \dots,$$

где λ_0 и λ_1 — значения плотности генерации новых первичных термокарстовых понижений соответственно для свободной поверхности и поверхности хасыреев.

¹ И для малых площадок и временных отрезков вероятность возникновения одного понижения много больше, чем вероятность возникновения нескольких понижений.



Рис. 3. Схема расположения ключевых участков.

2. Возникновение первичных термокарстовых понижений не происходит на площади существующих термокарстовых озер.

3. Радиус возникшего термокарстового понижения как функция времени представляет собой случайный процесс; изменение радиуса происходит независимо от других озер, и его скорость пропорциональна плотности тепловых потерь через боковую поверхность озерной котловины.

4. В процессе роста озеро может перейти в хасырей при его спуске эрозионной сетью, вероятность этого не зависит от других озер; при этом рост озера прекращается.

5. Возникновения истоков эрозионных форм на непересекающихся площадках являются независимыми случайными событиями со средней плотностью расположения истоков γ_0 и γ_1 соответственно для свободной поверхности и хасыреев; вероятность наличия истока для пробной площадки зависит только от ее величины².

Проведем математический анализ модели морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин. При этом используем результаты, полученные в базовом варианте модели, которые справедливы и в этом случае (Викторов, 2006):

распределение (плотность распределения) радиуса озера через время t после его появления при свободном росте,

$$f_0(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x\sqrt{t}}} e^{-\frac{(\ln x - at)^2}{2\sigma^2 t}}, \quad (1)$$

² Для малых площадок много больше, чем вероятность наличия более, чем одного истока.

где a, σ – параметры распределения, распределение расстояния от центра озера до ближайшего истока эрозионной формы

$$F(x) = 1 - e^{-\gamma x^2}, \quad (2)$$

где γ – параметр распределения.

Получим выражение, описывающее динамику доли основной поверхности (составляющая 1) (поверхность вне озер и хасыреев) $P_0(t)$. Воспользуемся тем, что она равна вероятности того, что случайная точка окажется на основной поверхности и не попадает ни в контур какого-либо озера, ни в контур хасырея.

Для решения ограничим рассматриваемую область кругом с радиусом R с центром, совпадающим с интересующей точкой O (рис. 4), и пока не учитываем озера и хасыреи, возникшие в пределах поверхности уже существующих хасыреев (составляющая 1).

Вероятность, что озеро, возникнув на некотором расстоянии x_i от центра, за время t заденет рассматриваемую точку (O), очевидно, складывается из вероятностей трех событий (рис. 4):

- 1) оказаться от нее на расстоянии x_i (то есть в кольце радиуса x_i с небольшой шириной Δx_i),
- 2) достижении озером за время t радиуса r большего, чем x_i и
- 3) отсутствию в круге описанного из центра озера с радиусом x_i истока эрозионной формы, который мог бы остановить рост озера до достижения точки O (с превращением озера в хасырей).

Вероятность второго и третьего событий определяются на основании выражений (1) и (2). Вероятность первого события в силу равной вероятности термокарстового понижения оказаться на

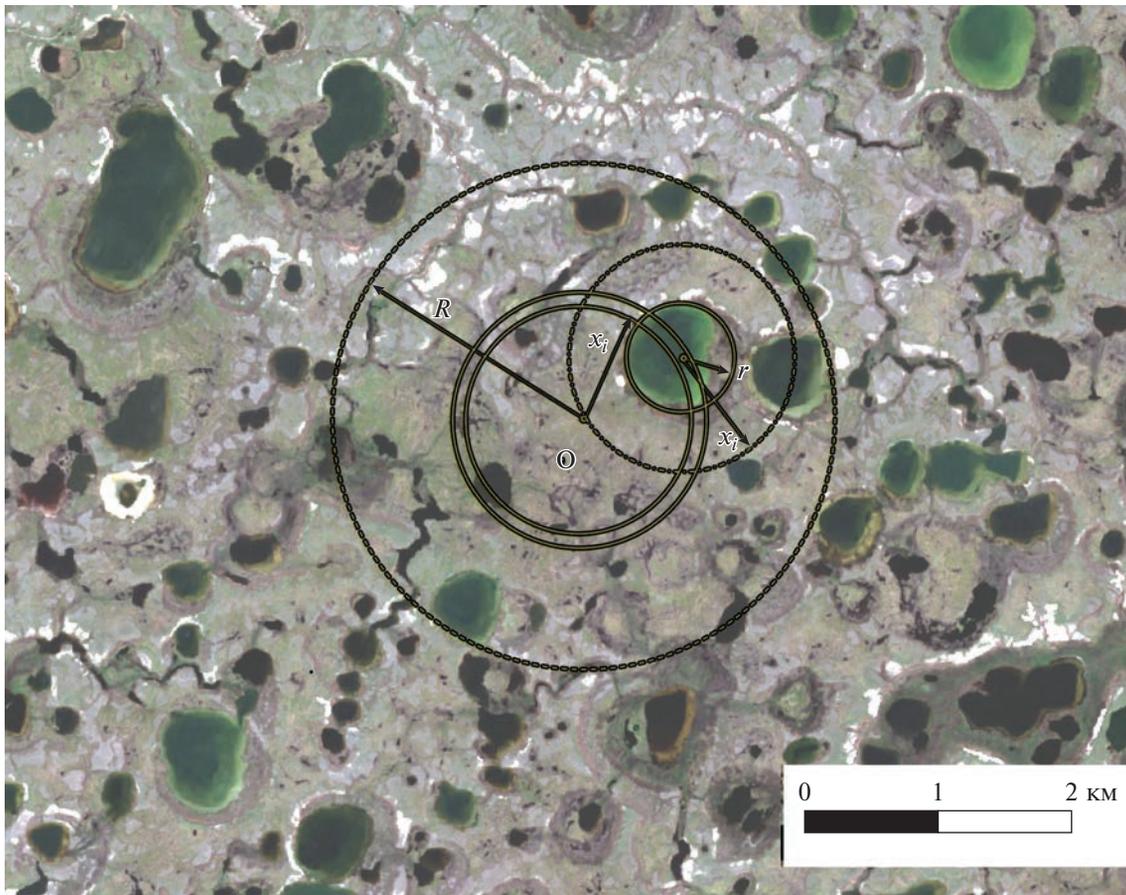


Рис. 4. Схема оценки заозеренности (пояснение в тексте).

площадках одного размера (допущение 1) равно отношению площади кольца к площади рассматриваемого круга; при этом следует учесть, что только часть их площади $P_0(t)$ относится к основной поверхности, но, поскольку часть эта одна и та же и для кольца, и для круга, то вероятность остается той же.

Перемножая вероятности с учетом независимости этих событий, и перебирая далее все значения x_i , путем интегрирования, получаем вероятность того, что озеро, возникнув в рассматриваемой круговой площади, заденет точку O

$$\alpha(u) = \int_0^R e^{-\pi r_0 x^2} [1 - F_0(x, u)] \frac{2\pi x}{\pi R^2} dx,$$

где $F_0(x, u)$ – распределение радиуса озера при свободном росте через время u после его возникновения (плотность этого распределения см. (1)). При этом точка будет или в пределах контура озера или, – в случае если озеро будет спущено после достижения точки до момента времени u , – попадет в пределы хасырея. В этом рассмотрении мы пренебрегаем вероятностью того, что растущее термокарстовое озеро, возникшее в пределах ос-

новной поверхности, будет спущено эрозионной формой с истоком, находящимся в пределах поверхности хасыреев.

Возникновение термокарстовых озер представляет собой, как показано ранее (Викторов, 1995, 2006), пуассоновский процесс. В силу этого вероятность того, что в пределах рассматриваемой области за время $[u_i, u_i + \Delta u_i]$ возникло k озер, равна, с учетом того, что свободная поверхность, на которой они возникают, составляют только часть площади равную $P_0(u_i)$,

$$P_{R,k}^0 = \frac{[\lambda_0 P_0(u_i) \Delta u_i \pi R^2]^k}{k!} e^{-\lambda_0 P_0(u_i) \Delta u_i \pi R^2}.$$

Отсюда учитывая вероятность того, что ни одно из появившихся в области озер (количеством k) не заденет точку, суммируя ряд по k и преобразуя, получаем вероятность того, что круговая площадь не будет задета озером, возникшим за время $[u_i, u_i + \Delta u_i]$ в рассматриваемой области с радиусом R

$$P_R = \sum_{k=0}^{+\infty} [1 - \alpha(t-u)]^k \frac{[\lambda_0 P_0(u_i) \Delta u_i \pi R^2]^k}{k!} e^{-\lambda_0 P_0(u_i) \Delta u_i \pi R^2} \\ = \exp[-\alpha(t-u) \lambda_0 P_0(u_i) \Delta u_i \pi R^2].$$

Соответственно, вероятность того, что круговая площадь не будет задета озером, возникшим за интервал времени $[0, t]$ в рассматриваемой области с радиусом R , с учетом независимости событий равна

$$P_R^0 = \prod_i \exp[-\alpha(t-u_i) \lambda_0 P_0(u_i) \Delta u_i \pi R^2] \\ = \exp \sum_i [-\alpha(t-u_i) \lambda_0 P_0(u_i) \Delta u_i \pi R^2],$$

где произведение берется по всему разбиению интервала $[0, t]$ на $[u_i, u_i + \Delta u_i]$. Полученная сумма при уменьшении величины интервала разбиений заменяется интегралом, и далее, используя выражение для $\alpha(u)$ и расширяя рассматриваемую область $R \rightarrow +\infty$, получаем

$$P_0^0(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_0 P_0(u) \int_0^{+\infty} 2\pi x e^{-\pi \gamma_0 x^2} [1 - F_0(x, t-u)] dx du \right],$$

где $F_0(x, u)$ – распределение радиусов термокарстовых озер при свободном росте с плотностью распределения, даваемой выражением (1).

Внутренний интеграл может быть упрощен при использовании интегрирования по частям и соответственно получаем вероятность того, что точка не будет задета озерами (впоследствии возможно превратившимися в хасыреи), возникшими в пределах основной поверхности (составляющая 1)

$$P_0^0(t) = \exp \left[- \frac{\lambda_0}{\gamma_0} \int_0^t P_0(u) du - \int_0^t P_0(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi \gamma_0 x^2} f_0(x, t-u) dx du \right], \quad (3)$$

где $P_0(t)$ – доля площади, свободной от озер в пределах основной поверхности (составляющая 1).

Рассуждая аналогично по отношению к озерам, возникшим в пределах поверхности хасыреев, получаем вероятность того, что точка не будет задета озерами (впоследствии возможно превратившимися в хасыреи), возникшими в пределах поверхности хасыреев.

$$P_0^1(t) = \exp \left[- \frac{\lambda_1}{\gamma_1} \int_0^t P_1(u) du - \int_0^t P_1(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi \gamma_1 x^2} f_1(x, t-u) dx du \right],$$

где $P_1(t)$ – доля площади, свободной от озер в пределах поверхности хасыреев (составляющая 2).

Поскольку возможность задеть точку озером, возникшим в пределах поверхности хасыреев, и озером, возникшим в пределах основной поверхности, события по допущениям модели независимые, то в итоге умножением получаем вероятность того, что случайная точка не будет задета термокарстовыми озерами (впоследствии возможно превратившимися в хасыреи), или, что то же самое, – долю основной поверхности свободной от озер и хасыреев

$$P_0(t) = \exp \left[- \frac{\lambda_0}{\gamma_0} \int_0^t P_0(u) du - \int_0^t P_0(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi \gamma_0 x^2} f_0(x, t-u) dx du - \frac{\lambda_1}{\gamma_1} \int_0^t P_1(u) du - \int_0^t P_1(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi \gamma_1 x^2} f_1(x, t-u) dx du \right]$$

или

$$\ln P_0(t) = - \frac{1}{\gamma_0} \times \left[\int_0^t \lambda_0 P_0(u) du - \int_0^t \lambda_0 P_0(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi \gamma_0 x^2} f_0(x, t-u) dx du \right] - \frac{1}{\gamma_1} \left[\int_0^t \lambda_1 P_1(u) du - \int_0^t \lambda_1 P_1(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi \gamma_1 x^2} f_1(x, t-u) dx du \right]. \quad (4)$$

Это выражение описывает динамику величины основной поверхности свободной от озер и хасыреев $P_0(t)$.

Исследуем динамику заозеренности. Как и в первом случае, воспользуемся тем, что дополнительная величина (незаозеренность) отвечает вероятности того, что случайная точка не попадает в контур какого-либо озера. На каждой поверхности по-отдельности (составляющая 1 и составляющая 2) можно считать, что процесс аналогичен базовому варианту. Согласно полученным в этом случае результатам (Victorov, 2005; Викторов и др., 2016, Викторов и др., 2021) в широком спектре условий наступает динамическое равновесие в процессах генерации и спуска озер. Одним из следствий этого является стабилизация общей заозеренности, слагающейся из доли площади озер, возникших в пределах основной поверхности, и

Таблица 2. Различие выборок площадей термокарстовых озер на основной поверхности и поверхности массивов хасыреев по критерию Смирнова

Индекс участка	Объем выборки 1 (основная поверхность)	Объем выборки 2 (поверхность хасыреев)	Модуль разницы эмпирических функций распределения	Параметр p^*)
19	87	105	0.359	$p < 0.001$
20	86	254	0.227	$p < 0.005$
21	252	172	0.276	$p < 0.001$
22	113	183	0.348	$p < 0.001$
25	131	116	0.098	$p > 0.10$
28	125	117	0.245	$p < 0.005$
30	260	132	0.261	$p < 0.001$
40	350	175	0.231	$p < 0.001$

*) Разница распределений статистически значима на уровне 0.99 в случае $p < 0.01$

озер, возникших в пределах поверхности хасыреев, то есть, начиная с некоторого $t = t_e$ для заозеренности $P_2(t)$ выполняется равенство

$$P_2(t) = L,$$

и также наступает стабилизация плотности расположения озер в пределах основной поверхности, и в пределах поверхности хасыреев соответственно (Victorov, 2005; Викторов и др., 2016; Викторов и др., 2021)

$$\int_0^t \lambda_0 P_0(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi\gamma_0 x^2} f_0(x, t-u) dx du = \tau'_0 = \text{const},$$

$$\int_0^t \lambda_1 P_1(u) \int_0^{+\infty} e^{-\pi\gamma_1 x^2} f_1(x, t-u) dx du = \tau'_1 = \text{const}. \tag{5}$$

Доля поверхности, занятой хасыреями, может быть найдена с учетом того, что сумма этой величины, заозеренности и доли площади основной поверхности составляет единицу, а значит

$$P_1(t) = 1 - L - P_0(t).$$

С учетом изложенного и выражений (4), после упрощения выражение для динамики основной поверхности (3) приобретает следующий вид

$$\ln P_0(t) = \left(\frac{\lambda_1}{\gamma_1} - \frac{\lambda_0}{\gamma_0} \right) \times$$

$$\times \int_0^t P_0(u) du - \frac{\lambda_1}{\gamma_1} \int_0^t (1-L) du + \frac{\tau'_0}{\gamma_0} + \frac{\tau'_1}{\gamma_1}.$$

Продифференцировав, после упрощения получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$\frac{dP_0}{dt} = \left(\frac{\lambda_1}{\gamma_1} - \frac{\lambda_0}{\gamma_0} \right) P_0^2 - \frac{\lambda_1}{\gamma_1} (1-L) P_0.$$

Уравнение решается стандартными методами и частное решение, отвечающее доли основной поверхности $P_0(t_e) = P_e$ в момент начала рассмотрения, соответствующий установлению динамического равновесия на основной поверхности и поверхности массивов хасыреев, дается выражением

$$P_0(t) = \frac{bP_e}{aP_e - (aP_e - b)e^{b(t-t_e)}}, \text{ где}$$

$$a = \frac{\lambda_1}{\gamma_1} (1-L), \quad b = \frac{\lambda_1}{\gamma_1} - \frac{\lambda_0}{\gamma_0}.$$

Таким образом, изменение во времени доли площади основной водораздельной поверхности, незанятой озерами, описывается данным выражением.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе исследований была осуществлена проверка предложенной модели на основе использования материалов космических съемок высокого разрешения.

Первым элементом проверки было сравнение эмпирических распределений выборок площадей термокарстовых озер, возникших на основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин и озер, возникших в хасыреях по каждому участку с использованием критерия Смирнова, который не зависит от видов рассматриваемых распределений. Оно позволило оценить статистическую значимость различия рассматриваемых распределений. Анализ показывает (табл. 2), что на 7 участках из 8 наблюдаются статистические значимые различия на уровне 0.99.

Вторым элементом проверки явилось сопоставление эмпирических и теоретических (мо-

Таблица 3. Сопоставление эмпирических и теоретических интегрально-экспоненциальных распределений площадей озер по критерию Пирсона.

Участок	Объем выборки	Значение критерия χ^2	Критическое значение критерия $\chi_{0.99}^2$	Эпсилон, м ²	Гамма, км ⁻²
Основная водораздельная поверхность					
19	87	5.537	9.210	473	3.271
20	86	7.678	6.635	2112	5.483
21	252	5.413	15.086	6972	0.697
22	113	4.870	11.341	7583	0.28
25	131	11.034	11.341	487	3.155
28	125	2.200	6.635	6898	0.316
30	260	22.570	13.277	194	5.021
40	350	13.143	13.277	217	5.917
Пониженная поверхность с хасыреями					
19	105	13.054	9.210	90	12.12
20	254	11.06	11.341	1307	7.573
21	172	5.843	9.210	662	1.412
22	183	3.589	9.210	1037	1.457
25	116	9.814	15.086	1519	5.416
28	117	4.341	11.341	3274	0.899
30	132	19.411	15.086	148	16.742
40	175	4.093	15.086	163	18.804

дельных) распределений. Как следует из развитой для рассматриваемого случая модели развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин (Victorov, 2005; Викторов и др., 2020; Викторов и др., 2016), в силу существования отдельно динамического равновесия в генерации, росте и спуске озер на основной поверхности и озер на поверхности хасыреев, должны наблюдаться интегрально-экспоненциальные распределения площадей озер с функцией плотности распределения

$$f_1(x, \infty) = -\frac{1}{xEi(-\gamma_1 \varepsilon_1)} e^{-\gamma_1 x}, \quad x \geq \varepsilon_1,$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – начальный размер озера соответственно для основной поверхности и поверхности хасыреев, γ_1, γ_2 – средняя плотности расположения истоков эрозионных форм соответственно для свободной поверхности и поверхности хасыреев, $Ei(-x)$ – интегрально-экспоненциальная функция.

При сопоставлении за оценку параметра ε принималось минимальное значение выборки, а значение γ находилось методом моментов путем численного решения в рамках специально созданного программного модуля уравнения

$$-\frac{1}{\gamma Ei(-\gamma \bar{\varepsilon})} e^{-\gamma \bar{\varepsilon}} = \bar{s},$$

где \bar{s} – средняя площадь озера.

С помощью того же модуля вычислялось значение критерия Пирсона, которое сравнивалось с критическим на уровне значимости 0.99.

Результаты оценки согласия эмпирических и теоретических интегрально-экспоненциальных распределений показывают (табл. 3), что на уровне значимости 0.99 на 6 участка из 8 распределение площадей термокарстовых озер, возникших в пределах основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин, согласуется с гипотезой о соответствии интегрально-экспоненциальному распределению. Распределение площадей термокарстовых озер, возникших в пределах поверхности хасыреев при том же уровне значимости согласуется с интегрально-экспоненциальным распределением также на 6 участках из 8, причем один из участков, на которых соответствие не наблюдается один и тот же (номер 30).

На рис. 5 приведены примеры графиков, отражающих как разницу распределений двух рассматриваемых групп, так и соответствие интегрально-экспоненциальному распределению.

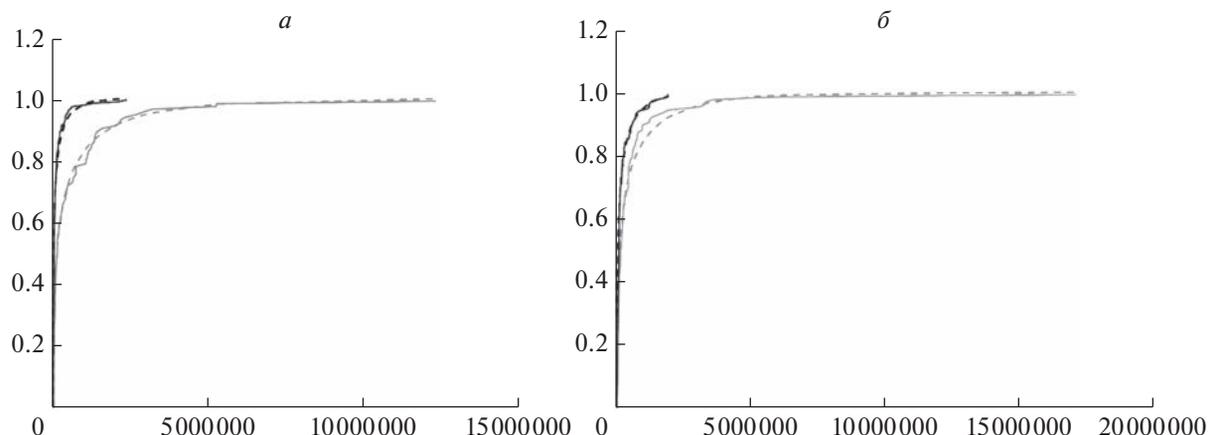


Рис. 5. Примеры графиков распределения площадей термокарстовых озер на участках 22 (а) и 28 (б): по оси x даны площади озер (m^2), по оси y – вероятность; черные линии – графики озер, возникших на поверхности массивов хасыреев, серые – на основной поверхности; сплошные линии – эмпирические распределения площадей, штриховые – теоретические интегрально-экспоненциальные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что предлагаемый новый вариант модели развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин в целом согласуется с эмпирическими данными и, видимо, лучше отражает протекающие процессы, чем базовый вариант. Так, полученные данные показывают существование статистически значимых различий распределений площадей термокарстовых озер, возникших на основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин и озер, возникших в пределах массивов хасыреев, это показывает рациональность лежащих в основе модели допущений.

Наблюдаемые интегрально-экспоненциальные распределения площадей в обеих рассматриваемых группах показывают справедливость анализа модели в важном пункте – наличие динамического равновесия в возникновении, росте и спуске термокарстовых озер, возникших на основной поверхности ландшафта эрозионно-термокарстовых равнин и озер, возникших в хасыреях. Во всех случаях интегрально-экспоненциальные распределения, относящиеся к озерам основной поверхности, и к озерам, относящимся к хасыреям, для одного и того же участка существенно различаются по значениям основного параметра γ . Эту разницу можно объяснить разной плотностью эрозионной сети на рассматриваемых двух типах поверхностей.

Использование предлагаемого нового варианта модели позволяет уточнить оценку риска поражения линейных сооружений, пересекающих эрозионно-термокарстовые равнины. Подход к количественной оценке риска поражения линей-

ных сооружений в пределах эрозионно-термокарстовых равнин был нами предложен в более ранних публикациях (Викторов и др., 2019). Из изложенного вытекает необходимость дифференцировать оценку риска в зависимости от площадных соотношений основной водораздельной поверхности и пониженной поверхности с хасыреями.

Таким образом, в итоге проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

На основе анализа материалов космических съемок разработан новый вариант модели развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин, учитывающий разный ход термокарстовых процессов на водораздельной поверхности и пониженной поверхности хасыреев, нередко образующих массивы.

Разработанный вариант модели подтверждается статистическим анализом и показывает существование динамического равновесия в возникновении, росте и спуске термокарстовых озер.

Морфологическая структура эрозионно-термокарстовых равнин эволюционно меняется, сокращая площадь основной водораздельной поверхности по зависимости, близкой к экспоненте; конкретный вид зависимости зависит прежде всего от отношения плотности генерации озер и плотности расположения истоков эрозионных форм.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-17-00226П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вельмина Н.А.* К вопросу о происхождении замкнутых (аласных) впадин Центральной Якутии // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1957. № 2. С. 97–106.
- Викторов А.С.* Математическая модель термокарстовых озерных равнин как одна из основ интерпретации материалов космических съемок // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 5. С. 42–50.
- Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М., Наука, 2006, 252 с.
- Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Архипова М.В., Березин П.В., Зверев А.В., Садков С.А., Панченко Е.Г.* Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М., РУДН, 2016, 232 с.
- Викторов А.С., Капралова В.Н., Архипова М.В.* Моделирование развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин с использованием материалов дистанционных съемок // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 55–64.
- Викторов А.С., Орлов Т.В., Садков С.А., Трапезникова О.Н.* Использование подходов математической морфологии ландшафта при дистанционной оценке природных опасностей // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. Вып. 5. С. 61–73.
- Викторов А.С., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Капралова В.Н., Архипова М.В.* Закономерности распределения площадей озер эрозионно-термокарстовых равнин // Докл. Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 108–111.
- Викторов А.С., Орлов Т.В., Капралова В.Н., Трапезникова О.Н., Зверев А.В.* Моделирование вариантов развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин. // Криосфера земли. 2021. Т. 25. № 1. С. 45–54.
- Гравис Г.Ф.* Роль склоновых процессов в эрозионно-термокарстовом расчленении аллювиальных равнин Якутии // Материалы VIII Всесоюз. междувед. сов. по геокриологии. Якутск, 1966. Вып. 6. С. 67–75.
- Кравцова В.И., Быстрова А.Г.* Изучение изменений распространения термокарстовых озер России по современным космическим снимкам // Криосфера Земли. 2009. Т. XV. № 2. С. 16–26.
- Павлов П.Д.* К вопросу о происхождении озерно-аласных котловин северо-восточной части Лено-Вилюйского междуречья // Уч. записки ЯГУ. Якутск, 1965. Вып. 14. С. 53–55.
- Полищук В.Ю., Полищук Ю.М.* Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск, УИП ЮГУ, 2013, 129 с.
- Суходровский В.Л.* Особенности морфогенеза современных и древних аллювиальных в условиях сурового климата // Проблемы геокриологии. Новосибирск: Наука, 1973. С. 96–107.
- Grosse G., Jones B. M., Nitze I. et al.* Massive thermokarst lake area loss in continuous ice-rich permafrost of the northern Seward Peninsula, Northwestern Alaska, 1949–2015 // XI. International Conference on Permafrost – Book of Abstracts (Potsdam, 20–24 June 2016), Potsdam, Germany, 2016. P. 739–740.
- Morgenstern A., Grosse G., Günther F, Fedorova, I., Schirmermeister L.* Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta. The Cryosphere Discussions, 2011, 5.
<https://doi.org/10.5194/tcd-5-1495-2011>
- Victorov A.S.* Mathematical Models of Thermokarst Erosion Plains // GIS and Spatial Analysis. Proc. of IAMG, Toronto, Canada, 2005. V. I. P. 62–67.

Developing the Model of the Morphological Pattern for Thermokarst Plains with Fluvial Erosion Involving Remote Sensing Data

A. S. Victorov¹, V. N. Kapralova¹, and T. V. Orlov¹

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia*

The paper reports a new variant of the model of the morphological pattern for thermokarst plains with fluvial erosion involving numerous remote sensing data. This variant of the model takes into account different trends of the thermokarst processes for watershed plains and lowered bottoms of khasyreis (drained thermokarst lakes). The given model is tested at eight key sites located in different physiography, climate and geocryology. Testing was based on the high-resolution remote sensing data. The developed model is verified with a statistical analysis of lake area distributions within both watershed plain surface and lowered bottoms of khasyreis, demonstrating a state of dynamic balance in the course of emergence, growth and drainage of the thermokarst lakes. The analysis shows that the morphological pattern of the thermokarst plains with fluvial erosion changes evolutionarily, with reducing the area of the main watershed surface according to a dependence close to exponential; the specific type of the dependence results primarily from the ratio of the lake generation density and the location density of the fluvial sources.

Keywords: mathematical morphology of landscapes, thermokarst plains with fluvial erosion, mathematical models of landscape morphological patterns, remote sensing data

REFERENCES

- Gravis G.F.* Rol' sklonovykh processov v erozionno-termokarstovom raschlenenii allyuvial'nykh ravnin YAkutii [The role of processes in the slope erosion-thermokarst dissection of the alluvial plains of Yakutia] // *Materialy VIII Vseoyuz. mezhdoved. sov. po geokriologii.* Yakutsk, 1966. Is. 6. P. 67–75. (In Russian).
- Grosse G., Jones B.M., Nitze I. et al.* Massive loss of the area of thermokarst lakes in the continuous ice-rich permafrost of the northern Seward Peninsula, Northwestern Alaska, 1949–2015 // *XI. International Conference on Permafrost – Collection of abstracts (Potsdam, June 20–24, 2016), Potsdam, Germany, 2016.* P. 739–740.
- Kravtsova V.I., Bystrova A.G.* Izuchenie izmenenij rasprostraneniya termokarstovykh ozer Rossii po raznovremennym kosmicheskim snimkam [The study of changes in the distribution of thermokarst lakes in Russia from different-time satellite images] // *Kriosfera zemli.* 2009. V. XV. № 2. P. 16–26. (In Russian).
- Morgenstern A., Grosse G., Gunter F., Fedorova I., Shirmeister L.* Spatial analysis of thermokarst lakes and basins in the landscapes of Edoma of the Lena Delta. Discussions about the Cryosphere, 2011, 5.
<https://doi.org/10.5194/tcd-5-1495-2011>
- Pavlov P.D.* K voprosu o proiskhozhdenii ozerno-alasnykh kotlovin severo-vostochnoj chasti Leno-Vilyujskogo mezhdurech'ya [On the question of the origin of the lake-alasnic basins of the north-eastern part of the Leno-Vilyui interfluve] // *Uch. zapiski YAGU.* Yakutsk, 1965. Iss. 14. P. 53–55. (In Russian).
- Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M.* Geoimitacionnoe modelirovanie polej termokarstovykh ozer v zonah merzloty [Geo-simulation of fields of thermokarst lakes in permafrost zones] // *Khanty-Mansiysk, UIP YUGU,* 2013, 129 p. (In Russian).
- Sukhodrovsky V.L.* Osobennosti morfogeneza sovremennykh i drevnih allyuvial'nykh v usloviyah surovogo klimata [Features of morphogenesis of modern and ancient alluvial in harsh climate conditions] // *Problemy geokriologii.* Novosibirsk.: Nauka, 1973. P. 96–107. (In Russian).
- Velmina N.A.* K voprosu o proiskhozhdenii zamknutykh (alasnykh) vpadin Central'noj YAkutii [On the question of the origin of the closed (alasny) depressions of Central Yakutia] // *Izv. AN USSR. Ser. geogr.* 1957. № 2. P. 97–106. (In Russian).
- Viktorov A.S.* Matematicheskaya model' termokarstovykh ozernykh ravnin kak odna iz osnov interpretacii materialov kosmicheskikh s"emok [Mathematical model of thermokarst lake plains as one of the bases of interpretation of space survey materials] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 1995. № 5. P. 42–50. (In Russian).
- Viktorov A.S.* Osnovnye problemy matematicheskoy morfologii landshafta [The main problems of mathematical morphology of the landscape]. M., Nauka, 2006, 252 p. (In Russian).
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Arkhipova M.V., Berezin P.V., Zverev A.V., Sadkov S.A., Panchenko E.G.* Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony [Mathematical morphology of cryolithozone landscapes]. M., RUDN, 2016, 232 p. (In Russian).
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Arkhipova M.V.* Modelirovanie razvitiya morfologicheskoy struktury erozionno-termokarstovykh ravnin s ispol'zovaniem materialov distancionnykh s"emok [Modeling of the development of the morphological structure of erosion-thermokarst plains using materials of remote surveys] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2019. № 2. P. 55–64. (In Russian).
- Viktorov A.S., Orlov T.V., Sadkov S.A., Trapeznikova O.N.* Ispol'zovanie podhodov matematicheskoy morfologii landshafta pri distancionnoj ocenke prirodnykh opasnostej [Using approaches of mathematical morphology of landscape in remote assessment of natural hazards] // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya.* 2019. Iss. 5. P. 61–73. (In Russian).
- Viktorov A.S., Orlov T.V., Trapeznikova O.N., Kapralova V.N., Arkhipova M.V.* Zakonomernosti raspredeleniya ploshchadej ozer erozionno-termokarstovykh ravnin [Patterns of distribution of lake areas of erosion-thermokarst plains] // *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle,* 2020. V. 491. № 2. P. 108–111. (In Russian).
- Viktorov A.S., Orlov T.V., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N., Zverev A.V.* Modelirovanie variantov razvitiya morfologicheskoy struktury erozionno-termokarstovykh ravnin [Modeling of variants of development of morphological structure of erosion-thermokarst plains] // *Kriosfera zemli.* 2021. V. 25. № 1. P. 45–54. (In Russian).
- Viktorov A.S.* Mathematical models of thermokarst erosion plains // *GIS and spatial analysis. Materials of the IAMG,* Toronto, Canada, 2005. V. I. P. 62–67.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОЗАПАСА ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ
РАДИОМЕТРА МСУ-ГС КА АРКТИКА-М № 1

© 2023 г. А. А. Филей^а, *, Ю. А. Шапилова^а

^аДальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
Хабаровск, Россия

*E-mail: andreyvm-61@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2022 г.

В статье представлена методика определения водозапаса облачности по данным дневных измерений радиометра МСУ-ГС, установленного на борту российского гидрометеорологического спутника «Арктика-М» № 1. В основе представленной методики лежат физические принципы взаимодействия электромагнитного излучения с частицами облачности в коротковолновой области спектра на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм. Полученные по данным радиометра МСУ-ГС оценки водозапаса облачности сопоставлялись с аналогичными оценками по данным радиометров AMSU/MHS и АНІ. По результатам сопоставления искомые оценки водозапаса капельной облачности находятся в допустимых пределах погрешности измерений, не превышающей 50 г/м². В тоже время в силу конструктивных особенностей радиометр МСУ-ГС не позволяет с требуемой точностью восстанавливать водозапас кристаллической облачности. В среднем оценка водозапаса кристаллической облачности по данным МСУ-ГС занижена на 110 г/м², а среднеквадратическая ошибка составляет 158 г/м² по сравнению с данными радиометра АНІ. Полученные оценки водозапаса были внедрены в геоинформационную систему «Арктика-М», обеспечивающую доступ к данным КА «Арктика-М» № 1 и результатам их тематической обработки в режиме, близком к реальному времени.

Ключевые слова: МСУ-ГС, Арктика-М № 1, водозапас, оптическая толщина, эффективный радиус, фазовое состояние, облачность

DOI: 10.31857/S0205961423030028, **EDN:** TYJFUD

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что облака являются главным фактором, влияющим на радиационные процессы, протекающие в атмосфере и формирующие погоду. Отражая солнечное излучение, облака препятствуют нагреву подстилающей поверхности и атмосферы, а поглощая собственное инфракрасное излучение (ИК) подстилающей поверхности и нижних слоев атмосферы – способствуют сохранению тепла. Одной из важнейших составляющих механизма взаимодействия электромагнитного излучения с облаками является присутствие в них воды (льда), которое характеризуется такой величиной, как водозапас (Liquid water path, LWP) облачности. LWP позволяет специалистам оценить общую массу сконденсированной воды в облаке с целью прогноза погоды, проверки климатических моделей и мониторинга изменения климата.

Одним из важных и эффективных, а порой и единственных, инструментов для получения обширной информации о LWP на сегодняшний день являются данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Космические аппараты

(КА) способны получать информацию о содержании капель воды и кристаллов льда в облаке в разных спектральных диапазонах, с различным временным и спектральным разрешением. В рамках настоящей работы представлен основанный на двухспектральной отражательной способности метод восстановления LWP по данным радиометра МСУ-ГС, установленного на борту российского гидрометеорологического спутника «Арктика-М» № 1. Принцип этого метода заключается в том, что коэффициент спектральной яркости (КСЯ) облаков в непоглощающем видимом (ВД) диапазоне длин волн в первую очередь зависит от оптической толщины облака (τ_v), а КСЯ в поглощающем ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне длин волн – от эффективного радиуса (r_e) облачных частиц. Данный метод хорошо себя зарекомендовал при определении LWP по данным таких радиометров, как AVHRR (Han et al., 1994), MODIS (Platnick et al., 2003), SEVIRI (Roebeling et al., 2006), ABI (Wolter et al., 2012).

Восстановление LWP с использованием КСЯ на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм рассматривается в данной статье применительно к дневным измере-

ниям радиометра МСУ-ГС, установленного на борту российского КА “Арктика-М” № 1.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ МСУ-ГС

КА “Арктика-М” № 1 функционирует на высокоэллиптической орбите, апогей которой проходит над северным полюсом Земли. Такая особенность орбиты позволяет получать метеорологическую и гидрологическую информацию о состоянии северных территорий с периодичностью от 15 мин одновременно в десяти спектральных диапазонах радиометра МСУ-ГС, основного прибора полезной нагрузки КА “Арктика-М” № 1. Радиометр МСУ-ГС позволяет получать изображение земной поверхности с разрешением 1 км в трех спектральных каналах ВД диапазона и семи каналах ИК диапазона с разрешением 4 км. Основные характеристики аппаратуры МСУ-ГС представлены в работе (Хартов и др., 2014). При создании МСУ-ГС максимально использовались современные отечественные электронные компоненты – многоэлементные приемники излучения в ИК диапазоне спектра и пассивная система их радиационного охлаждения до криогенных температур. Это позволило создать прибор по своим характеристикам, не уступающим зарубежным аналогам.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ LWP

Как было отмечено ранее, в основе восстановления LWP лежит использование КСЯ в коротковолновом (КВ) диапазоне длин волн. Как правило в большинстве современных спутниковых приборов используют длины волн 0.6 и 1.6 мкм. На длине волны 0.6 достигается максимум рассеяния электромагнитного излучения облачностью, которое зависит от ее оптической толщины, в то время как на длине волны 1.6 мкм рассеяние уменьшается с ростом размеров частиц облачности, эффективно поглощающих электромагнитное излучение на этой длине волны.

Для определения LWP в рамках настоящей работы используются каналы радиометра МСУ-ГС на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм (центры рабочих участков спектра коротковолновых каналов №№ 1 и 4). В силу своих конструктивных особенностей радиометр МС-ГС не имеет канала в окрестности длины волны 1.6 мкм, в связи с чем, для определения LWP используется канал на длине волны 4.0 мкм. Функциональные возможности канала 4.0 мкм накладывают ряд ограничений на использование с него информации. Во-первых, канал 4.0 мкм имеет меньшее по сравнению с каналом 0.55 пространственное разрешение, равное 4 км. Во-вторых, самым главным ограничением

является низкое отношение/сигнал шум КСЯ канала 4.0 мкм, регистрирующего только малую часть солнечного излучения. Несмотря на все ограничения, канал на длине волны 4.0 мкм позволяет точнее определять LWP кучево-дождевых облаков, так как основной вклад в излучение на этой длине волны дают вершины облаков, в то время как на длине волны 1.6 мкм основной вклад идет от нижних слоев облачности (Platnick, 2000).

Процесс взаимодействия электромагнитного излучения с частицами облачности определяется КСЯ (R_c), который вычисляется следующим образом:

$$R_c(\theta_0, \theta, \Delta\phi, \tau_c, r_e) = \frac{\pi I_c(\theta_0, \theta, \Delta\phi, \tau_c, r_e)}{F_0 \cos(\theta_0)}, \quad (1)$$

где I_c – интенсивность излучения на верхней границе облачности; F_0 – эффективный интегральный поток солнечного излучения в спектральном канале; θ_0 – зенитный угол Солнца; θ – зенитный угол спутника; $\Delta\phi$ – относительный азимутальный угол.

Отражение солнечного излучения в системе “подстилающая поверхность – атмосфера” зависит не только от оптических свойств облачности, но и от оптических свойств самой атмосферы и отражающих свойств подстилающей поверхности, которые влияют на точность восстановления LWP. С учетом вышеперечисленных факторов выражение (1) можно представить в следующем виде (Wolter et al., 2012):

$$R_{\text{ТОА}} = \left(R_c(\theta_0, \theta, \Delta\phi, \tau_c, r_e) + \frac{A_g T_c(\theta_0, \tau_c, r_e) T_c(\theta, \tau_c, r_e)}{1 - A_g A_{\text{sph}}(\tau_c, r_e)} \right) T_g, \quad (2)$$

где $R_{\text{ТОА}}$ – КСЯ на верхней границе атмосферы; T_g – коэффициент пропускания атмосферы; T_c – коэффициент пропускания облачности; A_{sph} – сферическое альbedo; A_g – альbedo подстилающей поверхности.

Методика восстановления LWP по спутниковым данным основана на сравнении рассчитанных с помощью выражения (2) и измеренных спутниковым прибором КСЯ частиц облачности с последующей оценкой τ_c и r_e . Согласно работе (Мазин и Хргиан, 1989) для вертикально однородного облака LWP можно рассчитать следующим образом:

$$LWP = \frac{3}{4} \tau_c r_e \rho, \quad (3)$$

где ρ – плотность частицы (1 г/см³ – капли воды, 0.917 г/см³ – кристаллы льда).

Выражение (3) позволяет оценить общую массу сконденсированной воды (капель воды или кристаллов льда) в столбе облачного слоя. Таким образом, определяется либо масса воды, либо

льда. Однако водозапас облачности зависит от многих факторов и в природе редко остается в одном состоянии. Обычно отчетливо проявляется определенная закономерность изменения водности облака с высотой, которая зависит от температуры и давления каждого облачного слоя (Мазин и Хргиан, 1989). Как правило, для оценки водозапаса разных типов облачности применяются различные выражения, полученные на основе некоторого набора статистических данных (Матвеев, 1984). Так в работе (Bennartz, 2007) предлагается использовать множитель $5/9$ вместо $3/4$ для определения LWP, как для капельной так и кристаллической облачности. В тоже время, исследования работы (Heumsfield et al., 2003) показывают, что с увеличением размера частиц кристаллов льда, их массовый коэффициент ослабления практически не изменяется, и LWP зависит напрямую от τ_c .

Для понимания процессов взаимодействия электромагнитного излучения с частицами облачности рассмотрим на рис. 1 результаты моделирования КСЯ для капель воды и кристаллов льда в КВ каналах МСУ-ГС. Результаты моделирования были получены авторами с помощью быстрой радиационной модели (RTM) на основе программного кода DISORT (Buras et al., 2011), входящего в состав библиотеки libradtran (Mayer et al., 2017). Для моделирования оптических свойств объемного рассеяния кристаллов льда облачности использовалась модель рассеяния Baum (Baum et al., 2005), а для капель воды – модель Ну (Hu et al., 1993). Учет поглощения солнечного излучения газовыми компонентами атмосферы осуществлялся с использованием параметризации REPTRAN (Gasteiger et al., 2014). При расчетах использовались функции спектральной чувствительности каналов МСУ-ГС на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм. В качестве примера была использована геометрия наблюдения с углами $\theta_0 = 45^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $\Delta\phi = 60^\circ$ градусов.

Согласно результатам моделирования, представленным на рис. 1 (цифрами по горизонтали отмечены τ_c , а по вертикали – r_e), значения R_c на длине волны 0.55 мкм ($R_c[0.55]$) (рис. 1а) независимо от размера частиц остается практически неизменным (для $\tau_c > 6$ и $r_e > 3$ мкм), в то время как на длине волны 4.0 мкм ($R_c[4.0]$) (рис. 1, б) картина наблюдается противоположная, значение R_c напрямую зависит от r_e . Видно, что выше определенного порога по τ_c и r_e значения R_c на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм практически ортогональны (пунктирная линия – τ_c , сплошная линия – r_e). Это означает, что для оптически толстых облаков ($\tau_c > 3$) можно определить τ_c и r_e , почти независимо, т.е. τ_c восстанавливается по каналу 0.55 мкм, а r_e – 4.0 мкм, и ошибки измерений в одном канале мало влияют на оптические свойства облачности,

определяемые в другом канале. Можно заметить, что при вариациях τ_c от 3 до 60 $R_c[0.55]$ меняется в довольно широких пределах от 0.2 до 0.8, как для капельной, так и кристаллической облачности. Однако, начиная с определенных значений τ_c ($\tau_c > 60$), чем значительно увеличивается τ_c , тем менее значительно изменяется $R_c[0.55]$. Это может приводить к большим неопределенностям, когда изменение $R_c[0.55]$ на 10%, может приводить к увеличению τ_c на 100%. В тоже время для капельной облачности при вариациях r_e от 3 до 25 мкм $R_c[4.0]$ меняется в пределах от 0.02 до 0.5, а для кристаллической облачности при вариациях r_e от 6 до 60 мкм $R_c[4.0]$ меняется в пределах от 0.01 до 0.13. Таким образом может возникнуть ситуация, когда при больших r_e , что, в первую очередь, актуально для кристаллической облачности, $R_c[4.0]$ будет иметь низкие значения, сопоставимые с величиной шума в канале на длине волны 4.0 мкм, это может приводить к большим неопределенностям при определении r_e , ошибка может доходить до 300%. Как показывает мировой опыт, именно использование канала на длине волны 1.6 мкм позволяет решать проблемы с низкой чувствительностью и низким отношением сигнал/шум, свойственных каналу на длине волны 4.0 мкм.

ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ LWP

В основе восстановления LWP по данным радиометра МСУ-ГС КА “Арктика-М” № 1 лежит использование справочных таблиц (lookup table, LUT), описывающих оптические характеристики объемного рассеяния частиц льда и капель воды. Использование LUT является распространенным подходом в оценке не только параметров облачности, но других аэрозолей. LUT строятся отдельно для капельной и кристаллической облачности, для различных атмосферных условий и геометрии наблюдений. Каждая LUT для каналов прибора МСУ-ГС на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм содержит смоделированные значения R_c , A_{sph} , T_g , T_c , которыми, в свою очередь, соответствует определенная комбинация τ_c и r_e . Процесс моделирования осуществлялся с помощью RTM libradtran для прозрачной атмосферы (в отсутствие других аэрозолей) над черной поверхностью с A_g равным нулю. Значения A_g , которые необходимы для учета влияния подстилающей поверхности, берутся из 16-дневных композитов продукта MOD43 радиометра MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod43.php>). Для простоты реализации предполагается, что облако рассматривается как однослойный однородный распределенный облачный слой.

Процедуре восстановления LWP по данным КА “Арктика-М” № 1 предшествует определение маски и фазового состояния облачности. По-

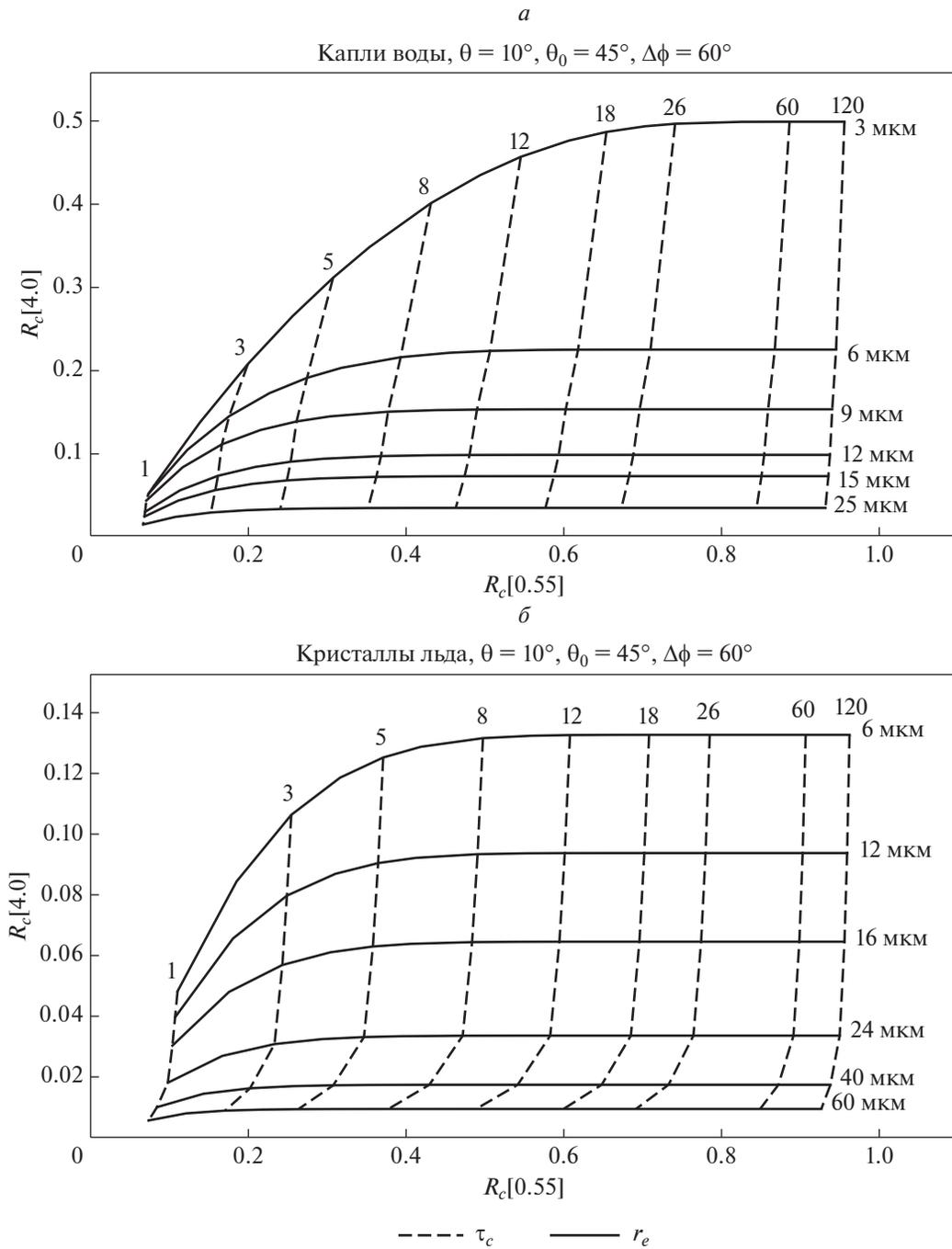


Рис. 1. Результаты моделирования КСЯ на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм (а) Капли воды; (б) Кристаллы льда.

дробно об определении этих параметров написано в работах (Филей, 2019; Андреев и Шамилова, 2021). Для каждого пикселя, помеченного маской облачности, в зависимости от фазового состояния и геометрии наблюдения проводилось сопоставление измеренных спутниковым радиометром МСУ-ГС и смоделированных (из LUT) значений R_{TOA} с целью определения значений τ_c и r_e . Для этого решалась обратная задача методом ста-

тистической регуляризации, который имеет широкое применение в задачах дистанционного зондирования Земли из космоса и позволяет находить несколько зависящих между собой целевых параметров по нескольким измерениям спутникового прибора.

Процедура оценки τ_c и r_e начинается с построения прямой модели вида:

$$y = F(x) + e, \quad (4)$$

$$y = [R_{\text{TOA},0.55}, R_{\text{TOA},4.0}] \quad x = [\tau_c, r_e],$$

где y – вектор измерений, размерностью m ; x – вектор искомых параметров, размерностью n ; F – оператор прямой модели; e – ошибки измерений.

Для решения обратной задачи с целью оценки искомых параметров вектора x , при которых смоделированные значения R_{TOA} наиболее точно соответствовали бы фактическим измерениям в каналах спутникового прибора, принимая во внимания ошибки измерения, осуществляется линеаризация прямой модели (4) с помощью следующего выражения:

$$y - F(x_a) = K(x - x_a) + e, \quad (5)$$

$$x_a = [\tau_{c,ap}, r_{e,ap}], \quad K = \frac{\partial F(x)}{\partial x},$$

где K – матрица весовых функций (якобианов), размерностью (m, n) ; x_a – вектор априорной информации искомых параметров.

Каждый элемент матрицы K является частной производной элемента прямой модели. Оценка вектора x , при котором достигается максимум вероятности того, что смоделированные значения в каналах прибора будут наиболее точно соответствовать фактическим измерениям, определяется минимизацией целевой функции вида:

$$\phi = (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) + (y - F(x, p))^T S_y^{-1} (y - F(x, p)), \quad (6)$$

где S_a – ковариационная матрица ошибок начальных приближений; S_y – ковариационная матрица ошибок измерения; ϕ – целевая функции.

Результаты оценки искомых параметров напрямую зависят от априорных значений и связанных с ними неопределенностей. Именно от правильного построения вектора x_a и ковариационных матриц ошибок зависит точность оценок τ_c и r_e .

Спектр размеров частиц облачности различен для разных типов облаков. Фактически размеры частиц облачности изменяются в широких пределах в зависимости времени года и климатических условий. В рамках настоящей работы было принято решение для каплей воды установить априорные значения r_e , равные 10 мкм, а для кристаллов льда – 30 мкм. Для капель воды и кристаллов льда априорные значения τ_c были приняты равными 15. Неопределенность в оценке априорных значений τ_c и r_e высока и может достигать до 100% и выше от установленных значений. Таким образом, вектор x_a и матрица S_a имеют следующий вид:

$$x_{a, \text{water}} = \begin{bmatrix} \tau_{c,ap} \\ r_{e,ap} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \end{bmatrix}, \quad x_{a, \text{ice}} = \begin{bmatrix} \tau_{c,ap} \\ r_{e,ap} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 30 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$S_a = \begin{bmatrix} \sigma^2(\tau_{c,ap}) & 0 \\ 0 & \sigma^2(r_{e,ap}) \end{bmatrix},$$

где $x_{a, \text{water}}$ – вектор x_a для капель воды, $x_{a, \text{ice}}$ – вектор x_a для кристаллов льда.

Ковариационная матрица S_a принимается диагональной, т.е. ошибки каждого из параметров матрицы не связаны между собой. Решение обратной задачи также требует оценки ковариационной матрицы S_y , которая строится на основе следующих источников ошибок: ошибка моделирования переноса излучения (σ_{rtm}); инструментальный шум в каналах спутникового прибора (σ_{instr}); ошибка калибровки (σ_{cal}); ошибка, связанная с пространственной неоднородностью облачности (σ_{het}). Ковариационная матрица S_y имеет вид:

$$S_y = \begin{bmatrix} \sigma^2(R_{\text{TOA},0.55}) & 0 \\ 0 & \sigma^2(R_{\text{TOA},4.0}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{instr}}^2 + \sigma_{\text{het}}^2 + \sigma_{\text{cal}}^2 + \sigma_{\text{rtm}}^2.$$

Рассмотрим подробно каждый из источников ошибок для их максимального вклада в результирующую ошибку.

1) Ошибки при расчетах LUT. Согласно работе (Walther and Heidinger, 2012), неопределенность в расчетах RTM может достигать 5%, и связана она, в первую очередь, с ошибками в оптических моделях объемного рассеяния капель воды и кристаллов льда и ошибками самой модели. Кроме этого на расчет КСЯ непосредственно влияет альbedo подстилающей поверхности. Неопределенность значений альbedo будет выше в тех регионах, где наблюдается сильная изменчивость в растительном или снежном покрове.

2) Инструментальный шум и ошибка калибровки каналов 0.55 и 4.0 мкм радиометра МСУ-ГС. Наименее значимую ошибку дает инструментальный шум, величина которого постоянная. В то время как, калибровка каналов спутникового прибора дает наибольшую ошибку. Например, ошибка калибровки в 5% может давать ошибку по τ_c в 30%. Именно три четверти всех ошибок при восстановлении τ_c приходится на инструментальный шум и калибровку. Так как для восстановления r_e , используется канал 4.0 мкм, то ошибки, связанные с калибровкой этого канала, будут давать еще большую неопределенность, чем для канала 0.55 мкм. Это прежде всего связано с низким показателем сигнал/шум КСЯ в канале 4.0 мкм.

3) Другой источник ошибок связан с пространственной неоднородностью облачности, когда область пикселя спутникового изображе-

Таблица 1. Неопределенности прямой модели

Параметр	σ_{instr}	σ_{het}	σ_{cal}	σ_{rtm}
$R_{TOA,0.55}$	0.005	Вычисляется по фактическим измерениям в окне размером 3×3	0.05	0.05
$R_{TOA,4.0}$	0.005		0.05	0.05

σ – безразмерная величина, [0;1]

ния частично покрыта облаками. Уменьшение доли облаков в пикселе приводит к снижению значений КСЯ в коротковолновых каналах. Эффект снижения будет наибольшим для оптически плотных облаков с малыми геометрическими размерами. Чтобы учесть ошибку неоднородности, рассматривается такое поле облачности, чтобы оно было больше, чем пространственное разрешение каналов спутникового прибора, чтобы охватить пиксели, полностью покрытые облачностью. В рамках работы σ_{het} рассчитывалась для блока пикселей спутникового изображения размером 3×3 .

Оценка неопределенности прямой модели для спутникового прибора МСУ-ГС приведена в табл. 1.

Для каждого пикселя изображения путем решения обратной задачи оцениваются параметры τ_c и r_c . Затем с помощью выражения (3) рассчитывается непосредственно LWP.

ВАЛИДАЦИЯ

Валидация спутниковых оценок большинства восстанавливаемых параметров атмосферы осуществляется обычно по данным прямых измерений, например, самолетных или наземных. Однако такие измерения носят локальный характер как по времени, так и пространству, и привязаны к определенной местности или определенному событию. В отсутствие объективных данных, как правило, используют косвенные измерения параметров атмосферы, полученные по результатам работы алгоритмов, которые прошли апробацию на объективных данных или на результатах других алгоритмов, точность которых известна.

В рамках настоящей работы валидация восстановленных по данным КА “Арктика-М” №1 оценок LWP проводилась путем сопоставления с аналогичными оценками, полученными по данным радиометров AMSU/MHS (серия спутников MetOp) и АНІ (Himawari-8). Методика определения LWP по данным AMSU/MHS основана на использовании уравнения радиационного переноса спутниковых измерений (Boukabara et al., 2011). Радиометр АНІ похож по своему функционалу на прибор МСУ-ГС и использует аналогичную методику восстановления LWP (Walther and Heidinger, 2012). Исключение составляет только то, что в от-

личие от МСУ-ГС используется канал на длине волны 1.6 мкм, вместо 4.0 мкм. Информация об LWP по данным приборов AMSU/MHS доступна на <https://www.avl.class.noaa.gov>, АНІ – <http://cimss.ssec.wisc.edu>.

Орбита полета КА “Арктика-М” № 1 позволяет охватить практически весь Арктический регион России с высокой временной дискретностью. Пространственный охват КА “Арктика-М” № 1 на двух рабочих участках (западный и восточный) орбиты показан на рис. 2.

Учитывая большой географический охват территории, валидация проводилась для различных климатических зон со своими уникальными природными особенностями. Были подготовлены наборы данных LWP, полученные по данным МСУ-ГС, AMSU/MHS и АНІ за период с марта по июль 2022 г. Отбирались близкие по времени с разницей не более 15 мин сеансы съемки. Выборка ограничивалась по широте, не превышающей 60 град. (красная линия на рис. 2). Выше 60 град. для измерений AMSU/MHS не проводится оценка водозапаса, а для АНІ имеют место серьезные спектральные и геометрические искажения. Зимние месяцы не учитывались в силу низких углов Солнца, при которых восстановление LWP по данным МСУ-ГС будет иметь существенные ошибки. Данные ограничивались зенитным углом Солнца менее 65 градусов. Так как пространственное разрешение каналов спутниковых приборов разное, то при сравнении результатов “пиксель в пиксель” могут возникать существенные погрешности, связанные с неоднородной структурой или краями облачности. Для решения данной проблемы валидация проводилась только на стабильных участках облачности, где среднеквадратическое отклонение LWP не превышало величину заявленной точности. Установленная Всемирной метеорологической организацией (ВМО) погрешность определения LWP не должна превышать 50 г/м² для капельной облачности и 100 г/м² для кристаллической облачности (Walther and Heidinger, 2012). Заявленная величина точности восстановления LWP достигается только при благоприятных условиях. Наличие осадков, многослойной облачности, а также неопределенностей представленного алгоритма могут увеличить ошибку в несколько раз. При этом сама оценка точности восстановления LWP по спутниковым

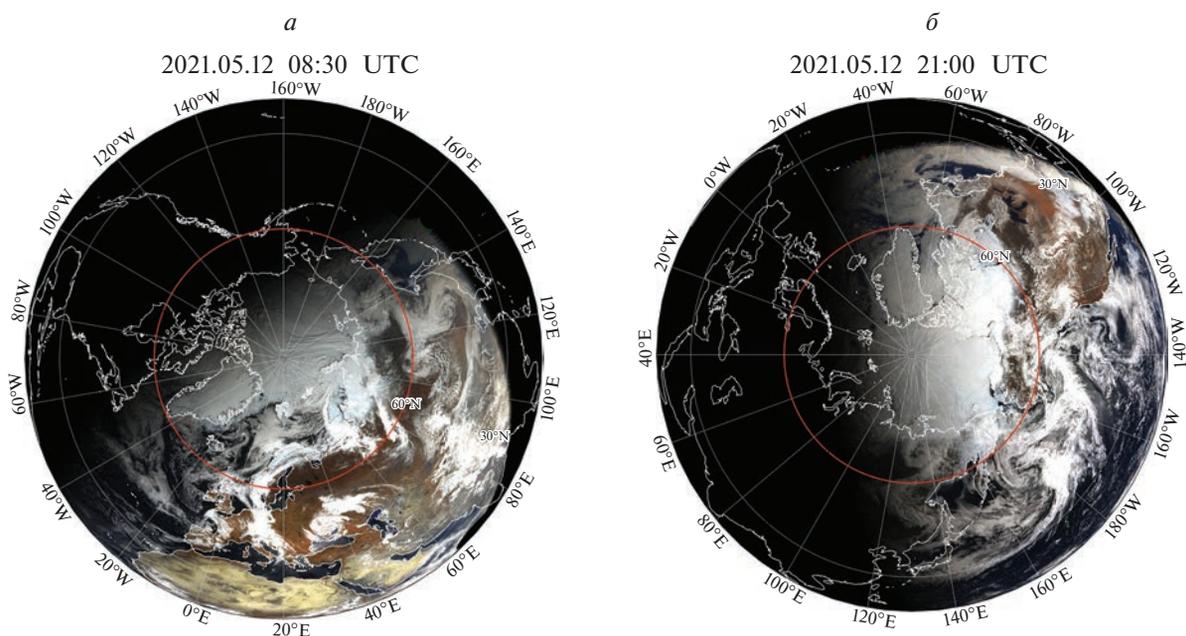


Рис. 2. Пространственный охват КА «Арктика-М» № 1 на двух рабочих участках орбиты: а – Западный; б – Восточный.

данным часто может быть не объективна из-за использования в сравнении результатов других алгоритмов, которые также обладают погрешностями восстановления. Тем не менее такой подход позволяет оценить условия работоспособности алгоритма и установить границы принятия решения, при которых восстановленные оценки LWP будут находиться в допустимых пределах точности. Также было принято решение ограничить выборку данных по τ_c , равной не менее 8, так как для оптически тонкой облачности восстанавливаемые значения LWP могут иметь большую неопределенность.

На рис. 3. Представлены функции плотности вероятности оценок LWP, полученных по данным приборов МСУ-ГС, AMSU/MHS и АНИ. В табл. 2 представлены объем выборки и статистика ошибок.

Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют о хорошей согласованности оценок LWP капельной облачности. В то же время ошибка для кристаллической облачности почти в пол-

тора раза превышает допустимые 100 г/м^2 . Согласно рис. 1 отражательная способность капель воды на длине волны 4 мкм выше, чем у кристаллов льда. В связи с чем с увеличением размера частиц повышается неопределенность при восстановлении LWP кристаллической облачности, что демонстрирует рис. 3, в. Так как диапазон изменчивости отражательной способности на длине волны 4.0 мкм мал для частиц большого размера, то и пик распределения плотности вероятности LWP на рис. 3, в более вытянут для МСУ-ГС по сравнению с АНИ. В связи тем, что канал 4.0 мкм регистрирует только малую часть солнечного излучения, то он с увеличением зенитного угла Солнца, будет и уменьшаться отношение сигнал/шум в этом канале. Таким образом, точность определения LWP по данным МСУ-ГС напрямую зависит от характеристик канала 4.0 мкм, и, к сожалению, низкая чувствительность данного канала к частицам большого размера не позволяет с

Таблица 2. Объем выборки и статистика ошибок.

Фазовое состояние	Объем выборки	BIAS (Смещение), г/м^2	RMSE, г/м^2
МСУ-ГС и AMSU/MHS			
Капельное	8459	-26	59
МСУ-ГС и АНИ			
Капельное	30886	-29	42
Кристаллическое	10242	110	159

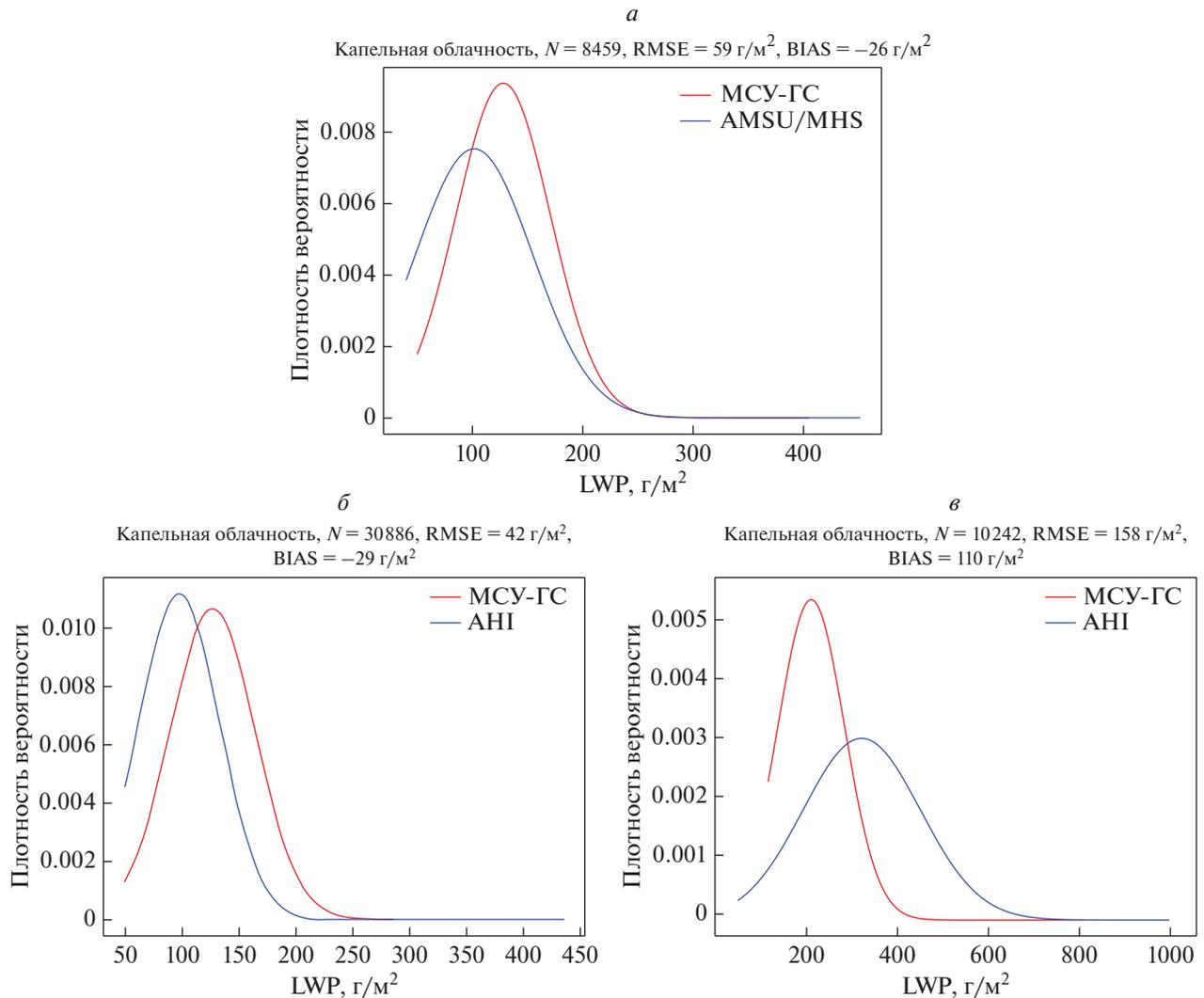


Рис. 3. Функции плотности вероятности оценок LWP: *a* – MSU-FC и AMSU/MHS (кап. облачность) *б* – MSU-FC и ANI (кап. облачность) *в* – MSU-FC и ANI (крист. облачность).

приемлемой точностью восстанавливать LWP кристаллической облачности.

Стоит отметить, что во время летных испытаний КА “Арктика-М” № 1 обсуждалась проблема невозможности получения с приемлемой точностью ряда информационных продуктов, в том числе и LWP, при использовании канала на длине волны 4.0 мкм. Было принято решение на следующих поколениях КА “Арктика-МП” добавить спектральный канал на длине волны 1.6 мкм.

Пример восстановленных оценок LWP по данным MSU-FC и ANI 2022.08.26 09:00 UTC представлен на рис. 4.

Визуально на рис. 3 области с высоким содержанием воды в облаках по данным MSU-FC и ANI совпадают. Таким образом данные радиометра MSU-FC можно использовать для косвенных оценок общей массы сконденсированной во-

ды в облаках с целью определения типов облаков и вероятности выпадения осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы представлена методика восстановления LWP по данным дневных измерений радиометра MSU-FC КА “Арктика-М” № 1. Были описаны физические принципы взаимодействия электромагнитного излучения с частицами облачности на длинах волн 0.55 и 4.0 мкм. Результаты сравнения оценок LWP капельной облачности, полученных по данным MSU-FC, с данными спутниковых радиометров AMSU/MHS и ANI показали высокую согласованность. В тоже время в силу конструктивных особенностей радиометр MSU-FC не позволяет с требуемой точностью восстанавливать LWP кристаллической облачно-

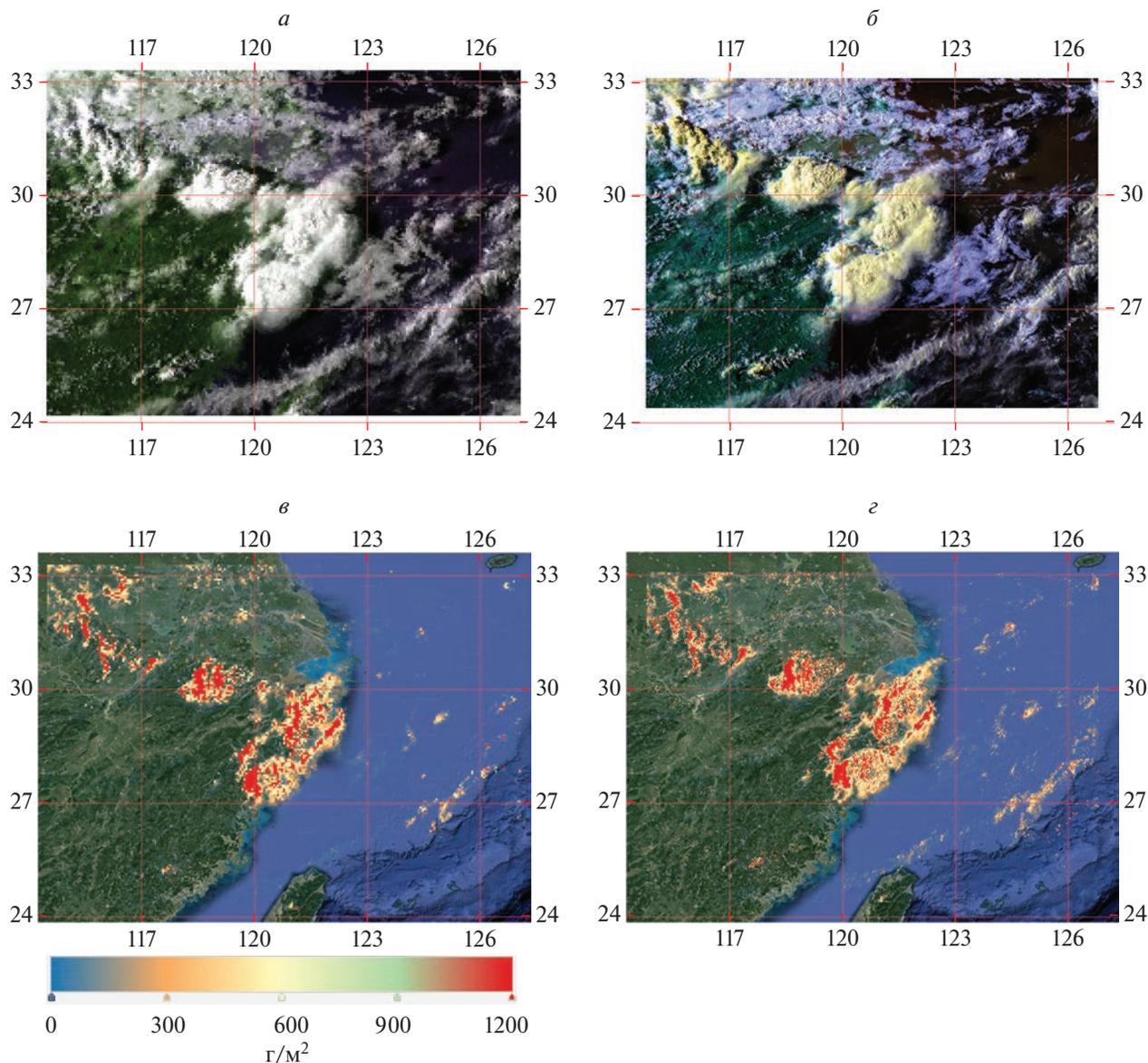


Рис. 4. Восстановленные оценки LWP по данным МСУ-ГС и АНИ 2022.08.26 09:00 UTC *а* – Цветосинтезированное изображение МСУ-ГС *б* – Цветосинтезированное изображение АНИ *в* – Водозапас по данным МСУ-ГС *з* – Водозапас по данным АНИ.

сти. С увеличением размеров частиц ошибка определения LWP также увеличивается. При этом стоит отметить, что оценка LWP кристаллической облачности по данным МСУ-ГС в среднем занижена на 110 г/м^2 по сравнению с данными радиометра АНИ.

Полученные оценки LWP по данным радиометра МСУ-ГС КА “Арктика-М” № 1 были внедрены в геоинформационную систему (ГИС) “Арктика-М”, которая представляет собой интернет-портал, обеспечивающий доступ к данным КА “Арктика-М” № 1 и результатам их тематической обработки (картам высоты, давления и

температуры на верхней границе облачности, морфологической классификации типов облаков, мгновенной интенсивности осадков, скорости и направления ветра и др.) в режиме, близком к реальному времени. В настоящее время ГИС “Арктика-М” используется северными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, авиационными метеорологами, а также органами государственной власти и МЧС. Информация о LWP, а также других параметрах облачности доступна на <http://apps.dvrcpod.ru/arcticgis/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.И., Шамилова Ю.А. Детектирование облачности по данным КА Himawari-8 с применением сверточной нейронной сети // Исслед. Земли из Космоса. 2021. № 2. С. 42–52.
- Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Справочник // Л.: Гидрометиздат. 1989. 647 с.
- Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосфер // Л.: Гидрометеиздат. 1984. 751 с.
- Филей А.А. Определение фазового состояния облачности по данным спутникового радиометра МСУ-МР космического аппарата “Метеор-М” № 2 // Оптика атмосферы и океана. 2019 Т. 32. № 5. С. 376–380.
- Хартов В.В., Мартынов М.Б., Бабышкин В.Е., Москатиньев И.В., Митькин А.С. Новая высокоэллиптическая космическая система “АРКТИКА” // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 104–109.
- Baum B.A., Heymsfield A.J., Yang P., Bedka S.T. Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part I: Microphysical data and models // J. Applied Meteorology and Climatology. 2005. V. 44. P. 1885–1895.
- Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Platnick S., King M.D., Hu Y.X., Bedka S.T. Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part II: Narrowband models // J. Applied Meteorology and Climatology. 2005. V. 44. P. 1896–1911.
- Bennartz R. Global assessment of marine boundary layer cloud droplet number concentration from satellite // J. Geophys. Res.: Atmos. 2007. V. 112(D2). 16 p.
- Buras R., Dowling T., Emde C. New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2011. V. 112(12). P. 2028–2034.
- Gasteiger J., Emde C., Mayer B., Buras R., Buehler S.A., Lemke O. Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2014. V. 148. P. 99–115.
- Han Q., Rossow W.B., Lacis A.A. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data // J. Climate. 1994. V. 7. P. 465–497.
- Heymsfield A.J., Matrosov S., Baum B. Ice Water Path-Optical Relationships for Cirrus and Deep Stratiform Ice Cloud Layers // J. Appl. Meteor. 2003. V. 42. № 10. P. 1369–1390.
- Hu Y.X., Stammes K. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models // J. Climate. 1993. V. 6. P. 728–742.
- Mayer B., Kylling A., Emde C., Buras R., Hamann U., Gasteiger J., Richter B. // LibRadtran user's guide. 2017. 155 p.
- Platnick S. Vertical photon transport in cloud remote sensing problems // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № D18. P. 22919–22935.
- Platnick S., King M.D., Ackerman S.A., Menzel W.P., Baum B.A., Riedi J.C., Frey R.A. The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2003. V. 41. P. 459–473.
- Roebeling R.A., Feijt A.J., Stammes P. Cloud property retrievals for climate monitoring: Implications of differences between Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) on METEOSAT-8 and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on NOAA-17 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2006. V. 111. № D20210. 16 p.
- Walther A., Heidinger A. Implementation of the Daytime Cloud Optical and Microphysical Properties. Algorithm (DCOMP) in PATMOS-x // J. Applied Meteorology and Climatology. 2012. V. 51. № 7. P. 1371–1390.

Retrieval of Cloud Liquid Water from MSU-GS Data On-Board Arctica-M No. 1

A. A. Filei¹ and Yu. A. Shamilova¹¹Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology “Planeta”, Khabarovsk, Russia

The paper presents the method for cloud water path retrieval from daytime MSU-GS measurements on board the Russian hydrometeorological satellite Arctica-M No. 1. The presented technique based on the physical principles of the interaction of electromagnetic radiation with cloud particles at wavelengths of 0.55 and 4.0 μm . Cloud water path estimates obtained from the MSU-GS radiometer were compared with similar estimates from the AMSU/MHS and AHI radiometer data. Based on the results of the comparison, the required estimates of the cloud water path of drop clouds are within the permissible limits of the measurement error, not exceeding 50 g/m^2 . At the same time, due to its design features, the MSU-GS radiometer does not allow retrieving the cloud water path of ice clouds with the required accuracy. On average, the cloud water path estimate of ice clouds according to the MSU-GS data is underestimated by 110 g/m^2 , and the root-mean-square error is 158 g/m^2 compared to the AHI radiometer data. The obtained estimates of the cloud water path introduced into the geographic information system Arctica-M, which provides access to the Arctica-M No. 1 data and the results of their thematic processing in a near real time mode.

Keywords: MSU-GS, Arctica-M No. 1, cloud water path, optical depth, effective radius, clouds

REFERENCES

- Andreev A.I., Shamilova Yu.A. Cloud detection using Himawari-8 satellite with a convolutional neural network // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. № 57. P. 1162–1170.
- Baum B.A., Heymsfield A.J., Yang P., Bedka S.T. Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part I:

- Microphysical data and models // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2005. V. 44. P. 1885–1895.
- Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Platnick S., King M.D., Hu Y.X., Bedka S.T.* Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part II: Narrowband models // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2005. V. 44. P. 1896–1911.
- Bennartz R.* Global assessment of marine boundary layer cloud droplet number concentration from satellite // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2007. V. 112(D2). 16 p.
- Boukabara S.-A. et al.* MiRS: An all-weather 1DVAR satellite data assimilation and retrieval system // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011. V. 49. № 9. P. 3249–3272.
- Buras R., Dowling T., Emde C.* New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2011. V. 112(12). P. 2028–2034.
- Filei A.A.* Opredelenie fazovogo sostoyaniya oblachnosti po dannym sputnikovogo radiometra MSU-MR kosmicheskogo apparata “Meteor-M” № 2 [Determination of cloud phase using MSU-MR measurements on-board Meteor-M No. 2] // *Optika atmosfery i okeana*. 2019. V. 32. № 5. P. 376–380. (In Russian).
- Gasteiger J., Emde C., Mayer B., Buras R., Buehler S.A., Lemke O.* Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2014. V. 148. P. 99–115.
- Hartov V.V., Martynov M.B., Babyshkin V.E., Moskatin’ev I.V., Mit’kin A.S.* Novaya vysokoellipticheskaya kosmicheskaya sistema “ARKTIKA” [New highly elliptical space system “ARKTIKA”] // *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 2014. V. 3. P. 104–109. (In Russian).
- Han Q., Rossow W. B., Lacis A.A.* Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data // *J. Climate*. 1994. Vol. 7. P. 465–497.
- Heymsfield A. J., Matrosov S., Baum B.* Ice Water Path-Optical Relationships for Cirrus and Deep Stratiform Ice Cloud Layers // *J. Appl. Meteor.* 2003. V. 42. № 10. P. 1369–1390.
- Hu Y.X., Stamnes K.* An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models // *J. Climate*. 1993. V. 6. P. 728–742.
- Mazin I.P., Hrgian A.H.* Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik [Clouds and cloudy atmosphere] // L.: Gidrometeoizdat. 1989. 647 p. (In Russian).
- Matveev L.T.* Kurs obshchej meteorologii. Fizika atmosfery [Course of general meteorology. Atmospheric physics] // L.: Gidrometeoizdat. 1984. 751 p. (In Russian).
- Mayer B., Kylling A., Emde C., Buras R., Hamann U., Gasteiger J., Richter B.* LibRadtran user’s guide. 2017. 155 p.
- Platnick S.* Vertical photon transport in cloud remote sensing problems // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № D18. P. 22919–22935.
- Platnick S., King M. D., Ackerman S.A., Menzel W.P., Baum B.A., Riedi J.C., Frey R.A.* The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 2003. V. 41. P. 459–473.
- Roebeling R.A., Feijt A.J., Stammes P.* Cloud property retrievals for climate monitoring: Implications of differences between Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) on METEOSAT-8 and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on NOAA-17 // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2006. V. 111. № D20210. 16 p.
- Walther A., Heidinger A.* Implementation of the Daytime Cloud Optical and Microphysical Properties. Algorithm (DCOMP) in PATMOS-x // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2012. V. 51. № 7. P. 1371–1390.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕГО ОРГАНИЧЕСКОГО СЛОЯ
ЛЕСНЫХ ПОЧВ ДЛЯ ЧАСТОТЫ 435 МГц**

© 2023 г. А. Ю. Каравайский^а, *, Ю. И. Лукин^а

^аИнститут физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: rsdak@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

Создана диэлектрическая модель, основанная на рефракционной диэлектрической модели смеси талых и мерзлых лесных органических почв корневой зоны для частоты 435 МГц. Модель разработана на основе диэлектрических измерений четырех почв, в которых содержание органического вещества варьировалось от 15 до 31%. Диэлектрические измерения были проведены в диапазоне массовой влажности от 0 до 0.6 г/г и диапазоне температур от –30 до 25°C. Коэффициент детерминации (R^2) между рассчитанными с использованием модели и измеренными значениями действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') частями комплексной диэлектрической проницаемости составил 0.97. Нормированное среднеквадратическое отклонение составило 16 и 21% для действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости соответственно. Разработанная диэлектрическая модель может быть применена в алгоритмах дистанционного зондирования при восстановлении значения влажности лесных почв корневой зоны из данных радарного и радиометрического зондирования.

Ключевые слова: диэлектрическая модель, влажность, температура, органическая почва, мерзлая почва, талая почва

DOI: 10.31857/S0205961423020021, **EDN:** TCWJRI

ВВЕДЕНИЕ

Корневая зона лесных почв играет жизненно важную роль в регулировании почвенного, водного и минерально-органического баланса, необходимого для функционирования лесной экосистемы (Shukla, Mintz, 1982). Влажность деятельного слоя лесных почв является важной переменной для приложений в области гидрологии, сельского хозяйства, метеорологии и изменения климата (Garrison et al., 2017; Nagarajan et al., 2012; Sabater et al., 2007).

В настоящее время разработаны космические радиометрические методы измерения влажности в поверхностном слое почв толщиной до 5 см (Escorihuela et al., 2010; Monerris et al., 2006) в глобальном масштабе на основе данных спутников SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (Kerr et al., 2010; Pan et al., 2012) и SMAP (Soil Moisture Active Passive) (Entekhabi et al., 2010; Pan et al., 2016) в L-диапазоне частот (1.4 ГГц). Для почв, покрытых негустой растительностью, погрешность измерения объемной влажности радиометрическими методами составляет порядка 4% (Grant et al., 2010; Zhang et al., 2011). С целью увеличения глубины мониторинга влажности почв в последние годы активно ведутся исследования в области разработки методов дистанционного

зондирования в P-диапазоне частот (Reigber et al., 2012; Garrison et al., 2017; Alemohammad et al., 2018; Carreiras et al., 2017). Показано, что глубина зондирования влажности почвы, непокрытой растительностью, на частоте 750 МГц с использованием наземного поляриметрического радиометра (угол наблюдения 30°) может достигать ~7–10 см (Ye et al., 2020; Shen et al., 2021). В ходе самолетных радарных поляриметрических наблюдений на частоте 435 МГц продемонстрирована возможность восстановления вертикального распределения влажности почвы до глубины порядка нескольких десятков сантиметров (Tabatabaeejad et al., 2015). Европейским космическим агентством планируется к запуску спутник BIOMAS, оснащенный радаром синтезированной апертуры с рабочей частотой 435 МГц (P-band) (Alemohammad et al., 2018; Carreiras et al., 2017), что создает технологическую возможность дистанционного зондирования влажности почвы под густой растительностью, включая лесной полог (Jagdhuber et al., 2012).

При этом модели комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почв являются одним из основных элементов в алгоритмах восстановления влажности почвы из радарных и радиометрических наблюдений с использованием

физических моделей радарного рассеяния и радиотеплового излучения. До настоящего времени в Р-диапазоне частот (435 МГц) не создано обобщенной диэлектрической модели для лесных почв, деятельный слой которых обладает значительным градиентом содержания органического вещества (Liebmann et al., 2020).

Существует ряд классических моделей, описывающих свойства дисперсных систем, в которые тем или иным образом входят диэлектрические проницаемости составляющих их веществ: модели Лихтенекера, Бругемана–Хана, Брауна и Оделевского (Шутко, 1986). Сравнение результатов расчетов, полученных при использовании трехкомпонентных моделей (минерал–вода–воздух), с экспериментальными данными для образцов песка и глины с влажностями до 20% показало, что наилучшее совпадение дает рефракционная модель диэлектрической проницаемости смеси (Шутко, 1986). Однако при этом не учитывается то обстоятельство, что часть влаги в почве присутствует в форме связанной воды. Диэлектрическая проницаемость связанной воды должна находиться в пределах от значений диэлектрической проницаемости льда до значений диэлектрической проницаемости свободной воды в зависимости от влажности почвы (Wang, Schmutge, 1980; Dobson et al., 1985). В связи с этим необходимо учитывать содержание связанной воды и ее диэлектрическую проницаемость в моделях КДП почв (Миронов и др., 1994; Боярский, Тихонов, 1995; Боярский, Тихонов, 2003).

В работе (Mironov et al., 2005) в диапазоне частот 0.8–12.5 ГГц были продемонстрированы результаты измерений КДП тундрово-лесных почв, отобранных в г. Тура (Восточная Сибирь), содержание глинистой фракции и гумуса в которых варьировалось от 3.25 до 24% и от 0.28 до 4% соответственно. Для описания КДП почв авторами (Mironov et al., 2005) использовалась четырехкомпонентная рефракционная диэлектрическая модель, параметры которой находились для каждого почвенного образца в отдельности. В работе (Owe et al., 1998) на частоте 1.67 ГГц (L-диапазон) и 5 ГГц (C-диапазон) проведены измерения КДП лесной почвы с содержанием глинистой фракции и органического вещества 10.5 и 1.47% соответственно, на основе которых показано, что модель Шмагге–Ванга (Wang, Schmutge, 1980) точнее описывает зависимость КДП почв от объемной влажности почвы по сравнению с моделью Добсона (Dobson et al., 1985). Разными авторами предпринимались попытки обобщить результаты диэлектрических измерений в широком диапазоне частот набора почвенных образцов со смешанным органоминеральным составом с использованием рефракционной диэлектрической модели (Мандрыгина, 2004, содержание гумуса в почвах 0.6, 6.6, 8.95, 100%; Бобров и др., 2008, содержа-

ние глинистой фракции и гумуса соответственно 0.3–12.8 и 4.35–56.1%; Репин, 2010; Бобров и др., 2013, содержание глинистой фракции и гумуса соответственно 0.8–72 и 0–6.6%; Беляева и др., 2013; Liu et al., 2013, содержание глинистой фракции и органического вещества от 6.7 до 68.7% и от 3 до 17.8% соответственно), а также с использованием других моделей КДП смеси (Park et al., 2017, 2019). Вследствие влияния релаксационных процессов Максвелла–Вагнера, обусловленных поляризацией межфазных границ вода–минерал, вода–воздух, наибольшая точность описания экспериментальных значений КДП в сверхшироком диапазоне частот от 1 кГц до 20 ГГц достигается при использовании комбинации многорелаксационной модели братьев Коул (Szyplowska et al., 2021) и рефракционной модели (Bobrov et al., 2022). В работе (Репин, 2010) показано, что использование многорелаксационной модели братьев Коул для описания КДП прочносвязанной воды дает большую точность, чем использование модели Дебая. При использовании комбинированной многорелаксационной диэлектрической модели параметры подбираются отдельно для каждого типа почвы и не удается получить общих зависимостей для всех параметров модели от содержания глинистой фракции и гумуса (Bobrov et al., 2022). Так, например, ранее авторами (Мандрыгина, 2004; Бобров и др., 2008; Liu et al., 2013) была предпринята попытка получить обобщенную формулу для количественной оценки максимального содержания связанной почвенной воды в зависимости от содержания глины и органического вещества (гумуса). Однако подобные обобщенные зависимости имеют низкую корреляцию между измеренными и рассчитанными по модели величинами максимального содержания связанной почвенной воды при сопоставлении с набором независимых данных (Бобров и др., 2008).

Вместе с тем показано, что модификация рефракционной модели с учетом локальных особенностей содержания глинистой фракции и гумуса в почвах редколесий северного Китая позволяет примерно в два раза улучшить точность восстановления влажности почвы: с 30 до 13% и с 16 до 7% соответственно, при использовании радиометрических данных спутников SMAP и SMOS на частоте 1.4 ГГц (Jin et al., 2017). Для рабочей частоты радиометров спутников SMAP и SMOS 1.4 ГГц проводились измерения КДП и создавались одночастотные специализированные модели почв, богатых органическим веществом, включая почвы бореальных лесов (Bircher et al., 2016). Авторами (Bircher et al., 2016) показано, что значения КДП влажных почв с высоким содержанием органики ниже значений КДП влажных почв с высоким содержанием минерального вещества, т.к. органические почвы содержат боль-

Таблица 1. Содержание органического вещества и гранулометрический состав исследуемых почв

№	Координаты места	Тип леса	Массовая доля органического вещества, %	Содержание фракций, %					
				1–0.25 мм	0.25–0.05 мм	0.05–0.01 мм	0.01–0.005 мм	0.005–0.001 мм	< 0.001
1	57°37'17.9" N 92°13'00.6" E	Сосна	21.4	–	–	–	–	–	–
2	57°37'22.8" N 92°13'01.4" E	Осина	31.1	–	–	–	–	–	–
3	57°37'21.1" N 92°15'03.0" E	Смешанный	27.8	–	–	–	–	–	–
4	57°39'45.0" N 92°16'12.2" E	Береза	14.8	2.8	10.8	47.3	10.5	12.8	15.8

ше связанной воды, чем минеральные почвы, диэлектрическая проницаемость у которой меньше, чем у несвязанной воды. Проводились отдельные специализированные диэлектрические измерения лесных почв Индии на частоте 9.6 ГГц в диапазоне объемной влажности от 0 до 30% (Patil et al., 2018), серых лесных почв (Чашниково, Московская область) с содержанием почвенных частиц размером менее 0.001 мм 11% и органического вещества 1.8% на частоте 50 МГц (Chudinova, 2009), торфа (Васюганские болота) в диапазоне температур от –30 до 30°C и в диапазоне частот от 10 МГц до 40 ГГц (Кочеткова, 2019).

Вместе с тем в литературе слабо представлены результаты исследования диэлектрических свойств органо-минеральных лесных почв в Р-диапазонах частот (на частоте 435 МГц) с целью разработки специализированных диэлектрических моделей для использования в алгоритмах спутника BIOMAS. Ранее на частоте 435 МГц были разработаны специализированные модели для минеральных (Fomin, Muzalevskiy, 2021) и органических (Savin, Muzalevskiy, Mironov, 2022) талых и мерзлых почв, образцы которых были отобраны в тундре (Аляска, п-ов Ямал, п-ов Таймыр). Созданные одночастотные модели КДП почв в сравнении со спектроскопическими моделями (Mironov et al., 2020; Replinski, Ulaby, Dobson, 1995; Zhang et al., 2010) обладают повышенной точностью и имеют существенно меньшее количество входных параметров, что является преимуществом в прикладных задачах дистанционного зондирования, в которых нет необходимости в информации о более тонких параметрах модели, таких как КДП связанной воды, время релаксации, статическая диэлектрическая проницаемость, энтропия и энтальпия фазового перехода и др. (Бобров и др., 2021).

В настоящей статье для использования на частоте 435 МГц предложена одночастотная диэлектрическая модель талых и мерзлых органо-минеральных почв, отобранных из верхнего слоя почвы преимущественно соснового, березового и смешанного лесов Красноярской лесостепи. Ди-

электрическая модель создана на основе рефракционной модели смеси (Комаров, Миронов, 2000; Mironov et al., 2020), параметры которой определены в зависимости от температуры лесных почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Почвенные образцы были отобраны в виде цилиндрических кернов диаметром 110 мм и высотой 300 мм с поверхности почвы соснового, осинового, смешанного и березового лесов Красноярской лесостепи, Пировского района, Красноярского края. Для модификации рефракционной диэлектрической модели отбирался верхний слой кернов (от 5 до 10 см), который преимущественно содержал в себе остатки перегнившей и неперегнившей растительности, опада, корневой системы и небольшое количество земли (преимущественно черного цвета), которое оставалось на корнях растений (рис. 1). Координаты мест отбора образцов почв и содержание органического вещества приведены в табл. 1. Исследование осуществлялось для образцов почв с различной массовой влажностью от сухого состояния до влажности 0.6 г/г и в диапазоне температур от –30 до 25°C. Общая процедура подготовки образцов почв для измерений подробно описана в работе (Mironov, Bobrov, Fomin, 2013). Содержание органического вещества в почве определялось по ГОСТ 27784-88 и ГОСТ 26213-91, содержание гранулометрического состава определялось по методике Качинского (Агрохимические..., 1975) (ФГБУ ГЦАС «КРАСНОЯРСКИЙ»). Для почв с содержанием органического вещества больше 20% по методике Качинского определить гранулометрический состав оказалось невозможным, поэтому для этих почв сведения по гранулометрическому составу в табл. 1 отсутствуют.

Массовая влажность образцов почвы m_g была определена как отношение массы воды в почве m_w к массе сухой почвы m_d : $m_g = m_w/m_d$. Погрешность измерения влажности составляла от 3 до 5% в за-



Рис. 1. Исследуемые почвы. Номера соответствуют номеру почвы из табл. 1.

висимости от значения массовой влажности. Всего было приготовлено по 20 образцов с различной влажностью для каждой почвы.

Измерения КДП влажных образцов проводились с использованием диэлектрического измерительного комплекса, в который входят: векторный анализатор цепей Keysight N5232, температурная камера SU-241 Espes, коаксиальный измерительный контейнер, персональный компьютер. Измеряемый образец почвы с заданной влажностью помещался в контейнер, выполненный в виде жесткой коаксиальной линии. Для измерений образцов с малой влажностью использовался контейнер длиной 37 мм, для образцов с высокой влажностью – контейнер длиной 17 мм. Радиус внешней оболочки обоих контейнеров составлял 7 мм, радиус центрального проводника – 3 мм. Измерения проводились в температурном диапазоне от -30 до 25°C . Для поддержания стабильной заданной температуры образца использовалась температурная камера SU-241 Espes. Точность установки температуры в камере составляет 0.1°C . С помощью векторного анализатора цепей были записаны амплитуды и фазы элемента матрицы рассеивания S_{12} влажных образцов почв на частоте электромагнитного поля 435 МГц. С помощью методики, изложенной в (Mironov et al., 2013), с использованием измеренных значений элемента матрицы рассеивания S_{12} были получены значения действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления (КПП) влажных образцов минеральной почвы $n_s^* = n_s + i\kappa_s$, где n_s и κ_s – показатель преломления (ПП) и нормированный коэффициент затухания (НКЗ) электромагнитной волны в измеряемом образце соответственно. Методика, изложенная в (Mironov et al., 2013), позволяет изме-

рять КДП с погрешностью от 1 до 10% для вещественной части и от 6 до 30% для мнимой части КДП в зависимости от значений этих величин и частоты электромагнитного поля.

Величина КПП связана с КДП $\epsilon_s^* = \epsilon_s' + i\epsilon_s''$ следующим соотношением:

$$n_s^* = \sqrt{\epsilon_s^*} = \sqrt{\epsilon_s' + i\epsilon_s''},$$

где ϵ_s' – относительная диэлектрическая проницаемость (ДП) влажной почвы, ϵ_s'' – коэффициент диэлектрических потерь (КП). ДП и КП легко выражаются через ПП и НКЗ следующим образом:

$$\epsilon_s' = n_s^2 - \kappa_s^2, \quad \epsilon_s'' = 2n_s\kappa_s.$$

ОДНОЧАСТОТНАЯ РЕФРАКЦИОННАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для описания зависимостей КДП почв от влажности, в соответствии с (Миронов, Савин, 2019), была использована диэлектрическая модель, основанная на рефракционном уравнении диэлектрической проницаемости смеси. Ранее в работах (Mironov, Roo De, Savin, 2010; Миронов, Савин, 2019) при исследовании органических почв, отобранных в тундровых регионах, было идентифицировано три категории почвенной воды, а именно: прочносвязанная вода, рыхлосвязанная вода и несвязанная вода (или лед в мерзлой почве). Данная классификация была применена на основании различий значений КДП категорий воды во влажной почве. В связи с этим для исследуемых органических почв было использовано следующее рефракционное диэлектрическое уравнение смеси с тремя категориями почвенной воды:

$$\frac{n_s - 1}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} m_g, & m_g \leq m_{g1}, \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} m_{g1} + \frac{n_t - 1}{\rho_t} (m_g - m_{g1}), & m_{g1} < m_g \leq m_{g2}, \\ \frac{n_m - 1}{\rho_m} + \frac{n_b - 1}{\rho_b} m_{g1} + \frac{n_t - 1}{\rho_t} (m_{g2} - m_{g1}) + \\ + \frac{n_{u,i} - 1}{\rho_{u,i}} (m_g - m_{g2}), & m_g > m_{g2}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\kappa_s}{\rho_d} = \begin{cases} \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_g, & m_g \leq m_{g1}, \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_{g1} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (m_g - m_{g1}), & m_{g1} < m_g \leq m_{g2}, \\ \frac{\kappa_m}{\rho_m} + \frac{\kappa_b}{\rho_b} m_{g1} + \frac{\kappa_t}{\rho_t} (m_{g2} - m_{g1}) + \\ + \frac{\kappa_{u,i}}{\rho_{u,i}} (m_g - m_{g2}), & m_g > m_{g2}. \end{cases} \quad (2)$$

В системах уравнений (1) и (2) индексы s, d, m, b, t, u и i относятся к влажной почве, сухой почве, органоминеральной компоненте, прочносвязанной воде, рыхлосвязанной воде, несвязанной воде и льду соответственно; m_{g1} – максимально возможное содержание прочносвязанной воды по весу в почве; m_{g2} – максимально возможное содержание общего количества связанной воды по весу в почве; m_g – массовая влажность образца; ρ_d – плотность сухого сложения почвы; $\rho_{b,t,u}$ – плотности категорий почвенной воды; ρ_i – плотность льда. Уравнения (1) и (2) описывают зависимости от массовой влажности приведенных определенных образом к единой плотности величин ПП и НКЗ кусочно-линейными функциями с точками излома, соответствующими m_{g1} и m_{g2} . Аппроксимация экспериментальных влажностных зависимостей ПП и НКЗ с использованием уравнений (1) и (2) дает возможность определить значения m_{g1} и m_{g2} во влажной почве при каждой температуре измерения. В качестве примера на рис. 2 символами показаны найденные зависимости приведенных ПП $((n_s - 1)/\rho_d)$ и НКЗ (κ_s/ρ_d) почв от влажности при температурах 20 и -20°C . Как можно увидеть на рис. 2, значения КПП в зависимости от влажности действительно могут быть описаны кусочно-линейной функцией с двумя изломами. Значение влажности m_{g1} , определяющее первую точку излома влажностной зависимости приведенных ПП и НКЗ, следует отнести к граничной влажности, разделяющей диапазоны влажностей, относящиеся к прочносвязанной и

рыхлосвязанной воде, а значение m_{g2} , определяющее вторую точку излома – к граничной влажности, разделяющей диапазоны влажностей, относящиеся к рыхлосвязанной и несвязанной воде или льду. Данные диапазоны отмечены на рис. 2 вертикальными пунктирными линиями. Таким образом, при анализе влажностных зависимостей, показанных на рис. 2, на частоте 435 МГц не удалось разделить по своим диэлектрическим свойствам воду, связанную на поверхности минеральных частиц, и воду, связанную на поверхности органических частиц, для рассматриваемых почв. Поэтому все параметры модели диэлектрической проницаемости, относящиеся к характеристикам категорий связанной воды, как и в работах (Mironov, Roo De, Savin, 2010; Миронов, Савин, 2019), будут эффективными для всего объема воды, связанной на минеральных и органических частицах.

На рис. 2 видно, что вариации величин приведенных ПП и НКЗ для различных почв при одинаковых влажностях невелики. В областях, относящихся к прочносвязанной и рыхлосвязанной воде, значения приведенных ПП и НКЗ для различных почв практически совпадают друг с другом, а в области несвязанной воды лишь незначительно превышают пределы погрешностей измерений этих величин. Это может свидетельствовать о том, что приведенные ПП и НКЗ твердой компоненты $\left(\frac{n_m - 1}{\rho_m}, \frac{\kappa_m}{\rho_m}\right)$, прочносвязанной воды $\left(\frac{n_b - 1}{\rho_b}, \frac{\kappa_b}{\rho_b}\right)$, рыхлосвязанной воды $\left(\frac{n_t - 1}{\rho_t}, \frac{\kappa_t}{\rho_t}\right)$ и несвязанной воды (или льда) $\left(\frac{n_{u,i} - 1}{\rho_{u,i}}, \frac{\kappa_{u,i}}{\rho_{u,i}}\right)$, слабо зависят или вовсе не зависят от содержания органического вещества для исследуемых почв. Анализируя значения параметров m_{g1} и m_{g2} для почв с различным содержанием органического вещества, на положительных температурах была обнаружена слабая зависимость m_{g2} от содержания органического вещества. На отрицательных температурах такой зависимости обнаружено не было. Принимая во внимание вышесказанное, было принято решение исключить из модели величину содержания органического вещества в качестве параметра. Таким образом, все параметры модели, описанные уравнениями (1) и (2), были общими для образцов с содержанием органического вещества от 14.8 до 31.1%. В результате применения такого подхода было сокращено число параметров разрабатываемой модели, что позволило ее немного упростить.

Поиск параметров диэлектрической модели осуществлялся с помощью процедуры аппрокси-

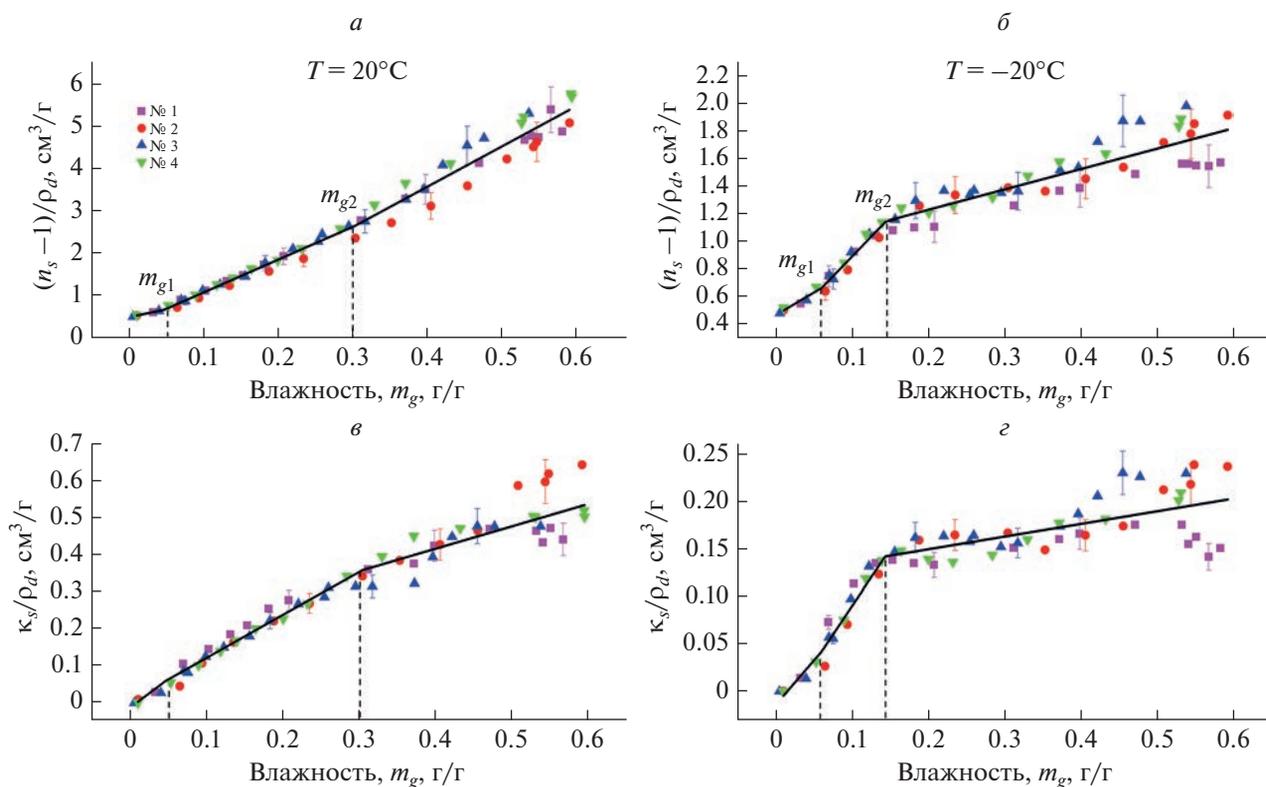


Рис. 2. Приведенные ПП и НКЗ измеренных почв при температурах 20°C (а), (в) и -20°C (б), (з) в зависимости от массовой влажности на частоте 435 МГц. Экспериментальные данные – символы, результат аппроксимации – линии. Номера соответствуют номерам почв из табл. 1.

мации полученных влажностных зависимостей приведенных ПП и НКЗ образцов почв с применением формул (1) и (2) в качестве теоретической модели. Ввиду того, что было принято решение не учитывать содержание органического вещества, аппроксимация проводилась одновременно для ПП и НКЗ всех четырех исследуемых почв на каждой температуре измерений. Результаты аппроксимации показаны на рис. 2 сплошными линиями.

Учитывая, что предлагаемая диэлектрическая модель была упрощена в результате исключения из нее влияния содержания органического вещества, необходимо было оценить потерю ее точности при таком допущении. Для этого была построена диэлектрическая модель, которая учитывает влияние вариации содержания органического вещества в исследуемых почвах на параметры модели. После чего был проведен анализ погрешностей двух моделей КДП органических почв: с учетом и без учета зависимости параметров модели КДП от содержания органического вещества в почве. Результаты данного анализа приведены в следующем разделе.

В результате аппроксимации влажностных зависимостей приведенных ПП и НКЗ почв были получены значения параметров $\left(\frac{n_m - 1}{\rho_m}\right)$, $\left(\frac{\kappa_m}{\rho_m}\right)$, $\left(\frac{n_b - 1}{\rho_b}\right)$, $\left(\frac{\kappa_b}{\rho_b}\right)$, $\left(\frac{n_t - 1}{\rho_t}\right)$, $\left(\frac{\kappa_t}{\rho_t}\right)$, $\left(\frac{n_{u,i} - 1}{\rho_{u,i}}\right)$, $\left(\frac{\kappa_{u,i}}{\rho_{u,i}}\right)$, m_{g1} и m_{g2} для каждой температуры из диапазона измерений, не зависящие от содержания органического вещества. Значения параметров m_{g1} и m_{g2} показаны символами на рис. 3. На рис. 3 видно, что m_{g1} в пределах ошибок измерений остается постоянной величиной, равной 0.06 ± 0.01 г/г во всем диапазоне температур измерений. Величина m_{g2} слабо меняется в области положительных температур и в среднем составляет 0.31 ± 0.06 г/г. При отрицательных температурах, с понижением температуры, значение m_{g2} уменьшается по экспоненциальному закону от значения 0.24 до 0.13 г/г.

Для описания температурных зависимостей m_{g1} и m_{g2} с помощью аппроксимации экспериментальных данных, приведенных на рис. 3, были получены следующие эмпирические формулы:

$$m_{g1} = 0.058, \quad -30 \leq t \leq 25^\circ\text{C},$$

$$m_{g2} = \begin{cases} 0.13 + 0.16 \exp(0.32 t), & -30 \leq t < 0^\circ\text{C}, \\ 0.307, & 0 \leq t \leq 25^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (3)$$

Расчитанные по формуле (3) значения m_{g1} и m_{g2} показаны на рис. 3 сплошными линиями.

Применяя метод аппроксимации к полученным влажностным зависимостям приведенных ПП и НКЗ исследуемых почв на каждой измеренной температуре, с использованием уравнений (1) и (2) в качестве теоретической модели, были получены температурные зависимости параметров, характеризующих ПП и НКЗ органоминеральной компоненты, прочносвязанной воды, рыхлосвязанной воды, несвязанной воды и льда. Найденные экспериментальные зависимости этих параметров приведены на рис. 4. Для полученных экспериментальных температурных зависимостей параметров с помощью аппроксимации были найдены следующие эмпирические формулы:

$$\frac{n_m - 1}{\rho_m} = 0.48, \quad \frac{\kappa_m}{\rho_m} = 0.005, \quad (4)$$

$$\frac{n_b - 1}{\rho_b} = 3.59,$$

$$\frac{\kappa_b}{\rho_b} = 0.81 + 0.63e^{0.11t}, \quad -30 \leq t < 0^\circ\text{C}, \quad (5)$$

$$\frac{\kappa_b}{\rho_b} = 1.34 + 0.01t, \quad 0 \leq t \leq 25^\circ\text{C},$$

$$\frac{n_t - 1}{\rho_t} = 7.03 + 0.05t, \quad -30 \leq t < 0^\circ\text{C},$$

$$\frac{n_t - 1}{\rho_t} = 7.68, \quad 0 \leq t \leq 25^\circ\text{C}, \quad (6)$$

$$\frac{\kappa_t}{\rho_t} = 0.83 - 0.02t, \quad -30 \leq t < 0^\circ\text{C},$$

$$\frac{\kappa_t}{\rho_t} = 0.83 + 0.02t, \quad 0 \leq t \leq 25^\circ\text{C},$$

$$\frac{n_u - 1}{\rho_u} = 1.45 + 0.61e^{0.12t}, \quad -30 \leq t < 0^\circ\text{C},$$

$$\frac{n_u - 1}{\rho_u} = 9.93 - 0.02t, \quad 0 \leq t \leq 25^\circ\text{C}, \quad (7)$$

$$\frac{\kappa_u}{\rho_u} = 0.14 + 0.09e^{0.19t}, \quad -30 \leq t < 0^\circ\text{C},$$

$$\frac{\kappa_u}{\rho_u} = 0.46 + 0.007t, \quad 0 \leq t \leq 25^\circ\text{C}.$$

Формулы (1)–(7) составляют температурно-зависимую диэлектрическую модель верхнего органического горизонта лесных почв для мерзлого и талого состояния на частоте 435 МГц. Входны-

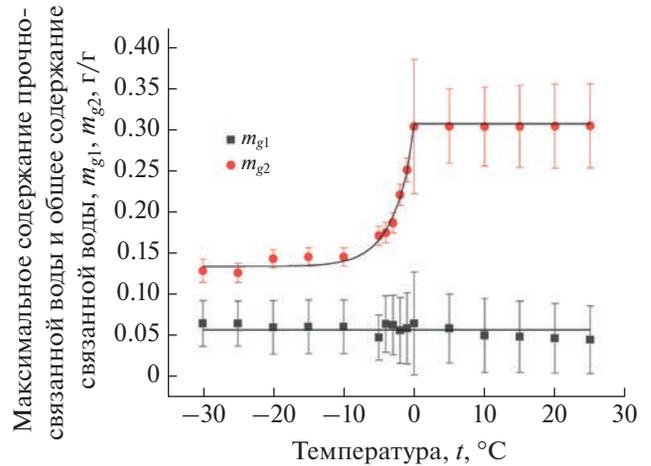


Рис. 3. Максимальное содержание прочносвязанной воды m_{g1} и общее содержание связанной воды m_{g2} в образцах органических почв.

ми параметрами разработанной модели КДП являются плотность сухой почвы ρ_d , массовая влажность m_g и температура t .

На рис. 4, б можно видеть, что при отрицательных температурах наблюдается рост приведенного НКЗ рыхлосвязанной воды с уменьшением температуры, тогда как для остальных категорий почвенной воды величина НКЗ убывает. Возможными причинами такого отличия температурных зависимостей НКЗ категорий почвенной воды в мегагерцовом диапазоне частот может быть влияние проводимости категорий почвенной воды в совокупности с релаксационными процессами, связанной с межфазной поляризацией Максвелла–Вагнера (Loewer, 2016; Миронов, 2019). Авторами работы (Миронов, 2019) для прочносвязанной воды в органических почвах арктического региона в мегагерцовом диапазоне частот было обнаружено наличие двух релаксационных процессов, при этом вклад данных релаксаций в спектр КДП прочносвязанной воды уменьшался с уменьшением температуры в диапазоне температур от 25 до -30°C , тем самым уменьшая вещественную и мнимую часть КПП. В несвязанной воде межфазных релаксаций в органической почве обнаружено не было. В рыхлосвязанной воде частота максимума поглощения электромагнитной волны, обусловленного релаксацией Максвелла–Вагнера, изменялась от 1.6 ГГц до 280 МГц при уменьшении температуры, при этом на частотах ниже частоты максимального поглощения электромагнитного поля за счет диэлектрической релаксации величина НКЗ увеличивается с уменьшением температуры вследствие сдвига максимума поглощения в область более низких частот, а затем НКЗ уменьшается после темпера-

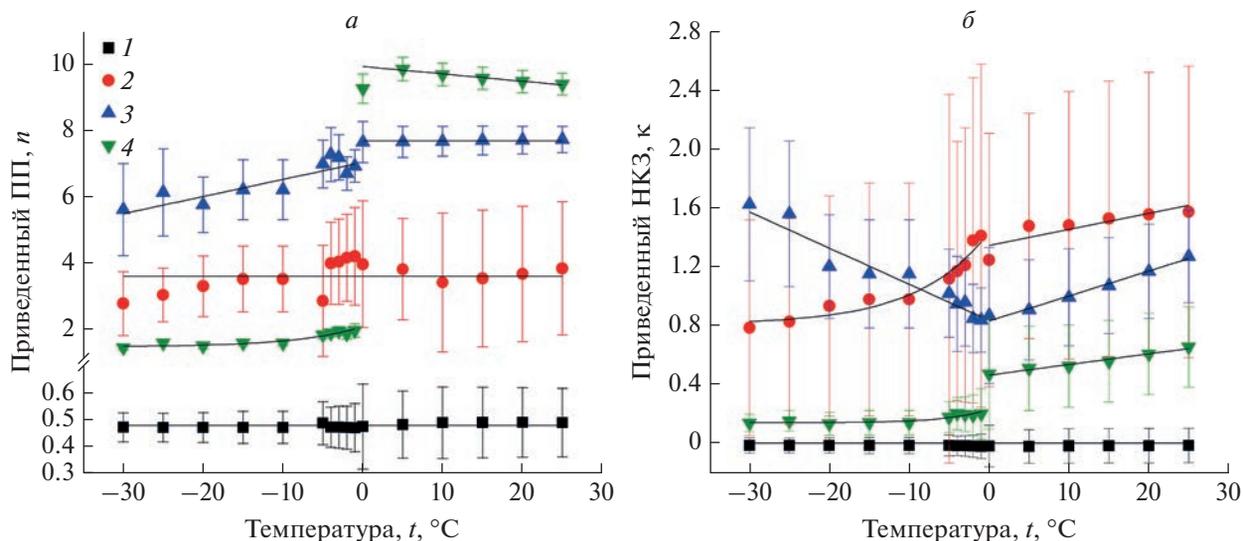


Рис. 4. Температурные зависимости приведенных ПП n (а) и НКЗ k (б) для органоминеральной компоненты (1), прочносвязанной воды (2), рыхлосвязанной воды (3) и несвязанной воды (или льда) (4) на частоте 435 МГц.

туры, на которой частота электромагнитного поля совпадает с частотой максимума поглощения. Таким образом, изменение частоты максимума поглощения электромагнитного поля за счет релаксации Максвелла-Вагнера в рыхлосвязанной воде могло привести к изменению характера показанной на рис. 4, б температурной зависимости приведенного НКЗ рыхлосвязанной воды на частоте 435 МГц и температуре около 0°C.

Как видно на рис. 4, б, найденные значения приведенных НКЗ категорий воды имеют довольно высокие погрешности с учетом малости самих величин. Данные погрешности рассчитывались как стандартная ошибка параметров, полученных при численной процедуре аппроксимации влажностных зависимостей приведенных величин ПП и НКЗ почвы, показанных на рис. 2. На величины рассчитанных ошибок повлияли близкие значения НКЗ прочносвязанной и рыхлосвязанной воды на частоте 435 МГц и разброс экспериментальных точек относительно теоретической кусочно-линейной зависимости, описанной формулами (1) и (2). Одной из причин разброса экспериментальных точек на рис. 2 является погрешность измерения самих величин ПП и НКЗ, причем для НКЗ относительная погрешность будет выше в силу того, что ее значения на частоте 435 МГц значительно ниже, чем значения ПП. Другими причинами являются погрешности измерения влажности и плотности образцов, возможные вариации гранулометрического и химического состава в образцах почв, на которые был разделен керн.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Погрешности разработанной одночастотной рефракционной диэлектрической модели (ОРДМ) оценивались путем сравнения рассчитанных с помощью модели значений КДП с соответствующими измеренными значениями. В качестве примера на рис. 5 символами показаны результаты измерений ДП и КП четырех исследуемых почв в зависимости от температуры для нескольких влажностей. Также на рис. 5 сплошными линиями показаны результаты расчетов по предложенной диэлектрической модели как для талого, так и для мерзлого состояния верхнего органического слоя лесных почв. Как видно на рис. 5, наблюдается хорошее соответствие между расчетными и измеренными значениями КДП влажных почв во всем диапазоне температур измерений.

На рис. 6 показаны вычисленные с помощью разработанной ОРДМ значения ДП и КП исследуемых почв в зависимости от их измеренных значений. С целью оценки погрешности предложенной модели КДП почв для приведенных на рис. 6 данных были рассчитаны нормированное среднеквадратическое отклонение (НСКО) модельных значений от измеренных и коэффициент детерминации R^2 . Формулы для вычисления НСКО и R^2 имеют следующий вид:

$$\text{НСКО} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - y_j)^2}{n}} \times 100\%, \quad (8)$$

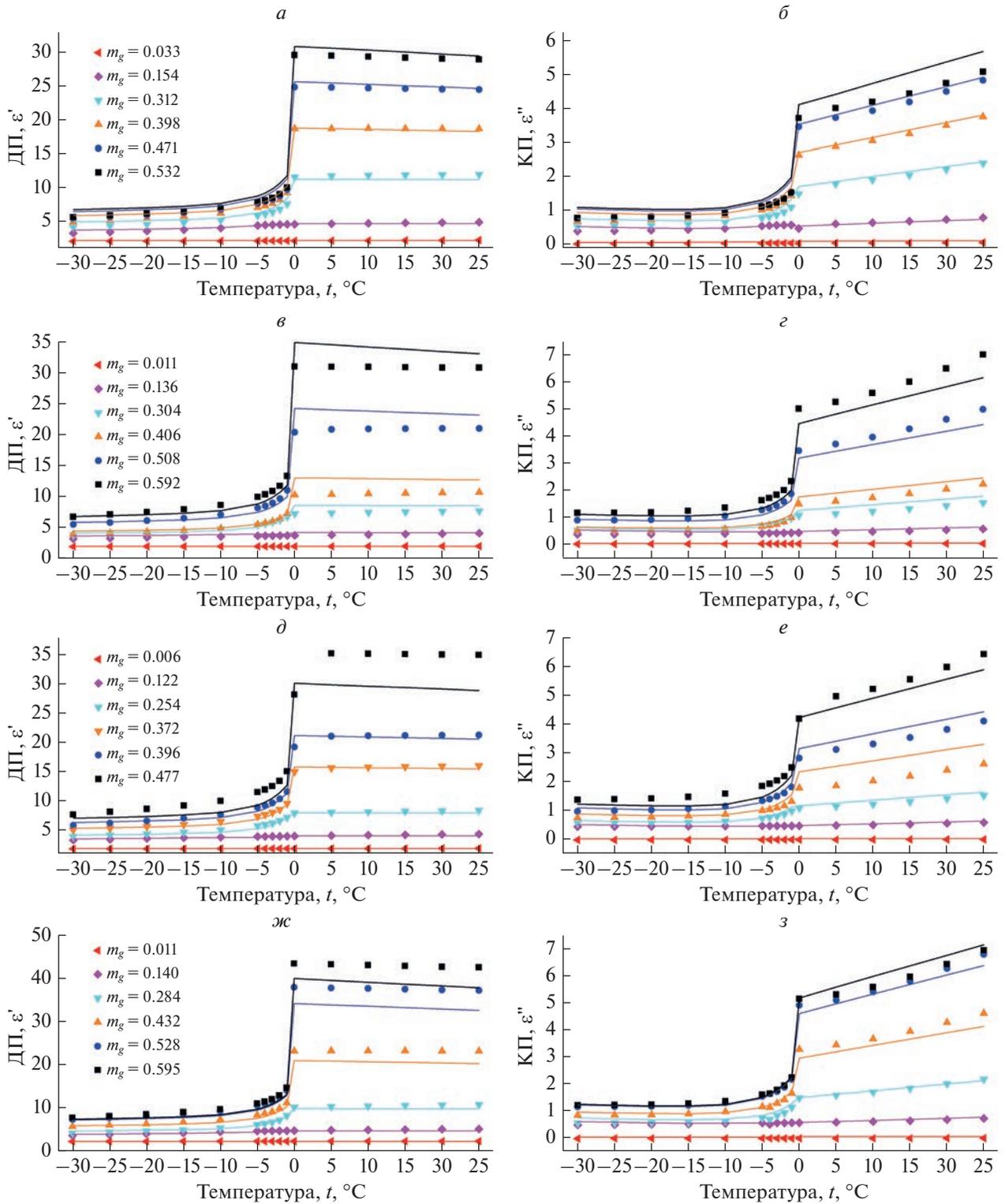


Рис. 5. Значения ДП и КП влажных образцов почв в зависимости от температуры: почва № 1 – *a*, *б*; почва № 2 – *в*, *г*; почва № 3 – *д*, *е*; почва № 4 – *ж*, *з*. Измеренные значения показаны символами, сплошные линии соответствуют значениям КДП почвы, рассчитанным с использованием разработанной модели.

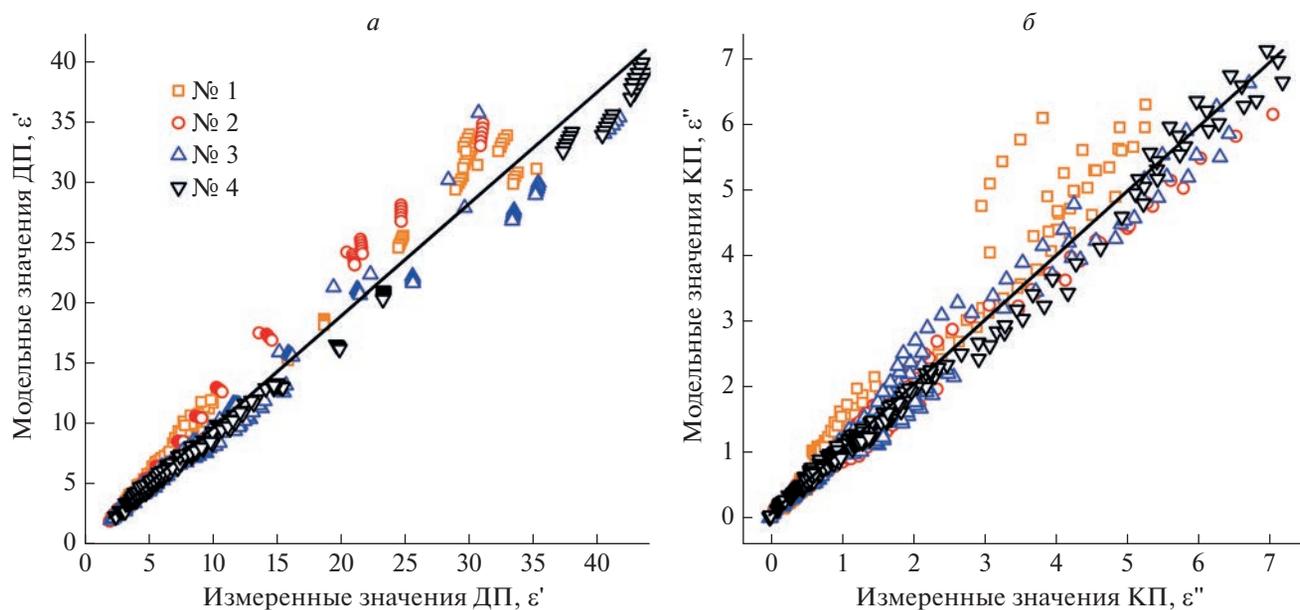


Рис. 6. Вычисленные с помощью разработанной диэлектрической модели значения ДП (а) и КП (б) исследуемых почв в зависимости от их измеренных значений. Сплошными линиями показаны результаты линейной аппроксимации.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_j (x_j - y_j)^2}{\sum_j (x_j - \bar{x})^2}, \quad (9)$$

где x_j, y_j, \bar{x} – измеренные значения, рассчитанные с помощью модели значения и среднее измеренное значение соответственно, n – число измерений. Значения полученных ошибок приведены в табл. 2. Анализируя погрешности, представленные в табл. 2, можно сделать вывод, что точность предложенной модели сопоставима с точностью измерения КДП.

Для того чтобы оценить потерю точности предложенной модели КДП вследствие исключения из рассмотрения зависимости параметров модели от содержания органического вещества в почвах, была оценена погрешность и для одночастотной рефракционной диэлектрической модели КДП лесных почв, учитывающей вариации содержания органического вещества в исследуемых почвах (ОРДМ СО). Значения НСКО и R^2 для ОРДМ СО также приведены в табл. 2. Анализируя

Таблица 2. Погрешности диэлектрических моделей для исследуемых органических почв.

	НСКО, %		R^2	
	ϵ'	ϵ''	ϵ'	ϵ''
ОРДМ	16	21	0.97	0.97
ОРДМ СО	14	22	0.98	0.96

данные из табл. 2, можно сделать вывод, что учет влияния вариации содержания органического вещества на параметры модели КДП не оказывает существенного влияния на точность модели. Разница между значениями НСКО при использовании моделей с учетом и без учета в качестве параметра модели величины содержания органического вещества для значений ДП составила менее 3%, а для значений КП – менее 1%. Это подтверждает обоснованность исключения зависимости параметров модели КДП исследованных лесных почв от величины содержания в них органического вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была предложена одночастотная диэлектрическая модель талых и мерзлых органических лесных почв корневой зоны на частоте 435 МГц, созданная на основе рефракционной диэлектрической модели смеси. Разработанная диэлектрическая модель применима для прогнозирования КДП верхнего слоя почв соснового, осинового, смешанного и березового лесов Красноярской лесостепи с содержанием органического вещества от 15 до 31%, с массовой влажностью от 0 до 0.6 г/г и в диапазоне температур от -30 до 25°C . По сравнению со спектроскопическими диэлектрическими моделями, разработанными в работах (Mironov et al., 2020; Миронов, Савин, 2019), предложенная одночастотная модель является более простой для практического применения, так как имеет минимальное число входных параметров, которые включают массовую влаж-

ность, температуру и плотность сухого сложения почвы. При анализе погрешностей созданной модели КДП почв было обосновано отсутствие необходимости учета зависимости параметров модели от величины содержания органического вещества, поскольку потеря точности при исключении из рассмотрения такой зависимости составляет по проведенным оценкам менее 3% для величины ДП и менее 1% для величины КП. Впервые для лесных почв Красноярской лесостепи диэлектрическим методом оценено предельное содержание связанной воды в зависимости от температуры.

Разработанная диэлектрическая модель может быть использована для интерпретации данных дистанционного зондирования на частоте 435 МГц, а также в алгоритмах измерения влажности, определения талого-мерзлого состояния лесных почв.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководителю лаборатории “Радиофизики дистанционного зондирования” к. ф.-м. н. К.В. Музалевскому за оказанную поддержку при написании данной работы, а также И.В. Савину за отбор исследуемых почвенных образцов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0287-2021-0034

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агрохимические методы исследования почв / ред. Соколов А. В. М.: Наука, 1975. 656 с.

Беляева Т.А., Бобров П.П., Кондратьева О.В. Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества // Вестник СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 92–95.

Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С., Родионова О.В. О параметрах диэлектрической модели почв, используемой в алгоритме SMOS // Техника радиосвязи. 2021. Вып. 1(48). С. 95–102. <https://doi.org/10.33286/2075-8693-2021-48-95-102>

Бобров П.П., Кондратьева О.В., Мустакова М.М. Влияние содержания органического вещества в почвах на диэлектрическую проницаемость в диапазоне частот 10–8.5 ГГц // Вестник СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 95–97.

Бобров П.П. Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели // Исслед. Земли из Космоса. 2008. № 1. С. 15–23.

Боярский Д.А., Тихонов В.В. Модель эффективной диэлектрической проницаемости влажных и мерзлых почв в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. № 6. С. 914–917.

Боярский Д.А., Тихонов В.В. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв // 2003.

Комаров А.С., Миронов В.Л. Микроволновое зондирование почв. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2000. 289 с.

Кочеткова Т.Д. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости торфа на СВЧ // 8-я Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы радиофизики. 2019. Тезисы докл. С. 196–199.

Мандрыгина В.Н. Диэлектрическая проницаемость почв с различным содержанием гумуса и влияние на нее гидрофобных и гидрофильных загрязнителей // Автореф дис на соиск уч. степ. к. ф.-м. н.: Омский пед гос унт. 2004. 16 с.

Миронов В.Л., Комаров С.А., Рычкова Н.В., Клеценко В.Н. Изучение диэлектрических свойств влажных почвогрунтов в СВЧ-диапазоне // Исслед. Земли из Космоса. 1994. № 4. С. 18–24.

Миронов В.Л., Савин И.В. Спектроскопическая много-релаксационная диэлектрическая модель талых и мерзлых арктических почв, учитывающая зависимость от температуры и содержания органического вещества // Исслед. Земли из Космоса. 2019. № 1. С. 62–73. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019162-73>

Музалевский К.В. Возможности дистанционного зондирования профилей влажности почв на основе поляриметрических наблюдений обратного рассеяния волн в Р- и С-диапазонах частот // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 203–216. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-203-216>

Ренин А.В. Методы измерения диэлектрической проницаемости различных форм почвенной влаги и нефтесодержащих пород // Автореф дис на соиск уч. степ. к. ф.-м. н.: Омский государственный педагогический университет. 2010. 22 с.

Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов // Наука, 1986.

Alemohammad S.H., Konings A.G., Jagdhuber T., Moghaddam M., Entekhabi D. Characterization of vegetation and soil scattering mechanisms across different biomes using P-band SAR polarimetry // Remote Sens. Environ. 2018. V. 209. P. 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.032>

Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V. The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies From 10 kHz to 8 GHz—Part I: Experimental // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. V. 60. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3180727>

Bircher S., Demontoux F., Zakharova E., Drusch M., Wigneron J.-P., Kerr Y.H. L-Band Relative Permittivity of Organic Soil Surface Layers—A New Dataset of Resonant Cavity Measurements and Model Evaluation // Remote Sensing. 2016. V. 8 № 12. P. 1024. <https://doi.org/10.3390/rs8121024>

Carreiras J.M.B., Quegan S., Le Toan T., Ho Tong Minh D., Saatchi S.S., Carvalho N. Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions // Remote Sens. Environ. 2017. V. 196. P. 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.003>

- Chudinova S.M.* Dielectric characteristics of soils and categories of soil water // *Eurasian Soil Sc.* 2009. V. 42. P. 405–414. <https://doi.org/10.1134/S1064229309040073>
- Dobson M., Ulaby F., Hallikainen M., El-rayes M.* Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1985. V. GE-23. № 1. P. 35–46. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289498>
- Entekhabi D., Njoku E.G., O'Neill P.E., Kellogg K.H., Crow W.T., Edelstein W.N., Entin J.K., Goodman S.D., Jackson T.J., Johnson J., Kimball J., Piepmeier J.R., Koster R.D., Martin N., McDonald K.C., Moghaddam M., Moran S., Reichle R., Shi J.C., Spencer M.W., Thurman S.W., Tsang L., Zyl J. Van.* The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission // *Proc. IEEE.* 2010. V. 98. № 5. P. 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
- Escorihuela M.J., Chanzy A., Wigneron J.P., Kerr, Y.H.* Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. № 5. P. 995–1001. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.011>
- Fomin S.V., Muzalevskiy K.* Dielectric Model for Thawed Mineral Soils at a Frequency of 435 MHz // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2021b. V. 18. № 2. P. 222–225. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2972559>
- Garrison J., Lin Y.-C., Nold B., Piepmeier J.R., Vega M.A., Fritts M., Du Toit C.F., Knuble J.* Remote sensing of soil moisture using P-band signals of opportunity (SoOp): Initial results // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): IEEE, 2017. P. 4158–4161. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127917>
- Grant J.P., de Griend A.A. Van, Wigneron J.-P., Saleh K., Panciera R., Walker J.P.* Influence of forest cover fraction on L-band soil moisture retrievals from heterogeneous pixels using multi-angular observations // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. № 5. P. 1026–1037. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.016>
- Jagdhuber T., Hajnsek I., Sauer S., Papathanassiou K.P., Bronstert A.* Soil moisture retrieval under forest using polarimetric decomposition techniques at P-band // 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2012. P. 709–712.
- Liu J., Zhao S., Jiang L., Chai L., Wu F.* The influence of organic matter on soil dielectric constant at microwave frequencies (0.5–40 GHz) // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS.* 2013. P. 13–16. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6721080>
- Jin M., Zheng X., Jiang T., Li X., Li X.-J., Zhao K.* Evaluation and Improvement of SMOS and SMAP Soil Moisture Products for Soils with High Organic Matter over a Forested Area in Northeast China. *Remote Sensing.* 2017. V. 9 № 4. P. 387. <https://doi.org/10.3390/rs9040387>
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martín-Neira M., Mecklenburg S.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE.* 2010. V. 98. № 5. P. 666–687. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>
- Liebmann P., Wordell-Dietrich P., Kalbitz K., Mikutta R., Kalks F., Don A., Woche S.K., Dsilva L.R., Guggenberger G.* Relevance of aboveground litter for soil organic matter formation – a soil profile perspective // *Biogeosciences.* 2020. V. 17. P. 3099–3113. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3099-2020>
- Loewer M., Igel J., Minnich, C., Wagner, N.* Electrical and dielectric properties of soils in the mHz to GHz frequency range // *Proceedings of the 11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA).* 2016. P. 247–254.
- Mironov V.L., Bobrov P.P., Bobrov A.P., Mandrygina V.N., Stasuk V.D.* Microwave dielectric spectroscopy of moist soils for a forest-tundra region // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2005. P. 4485–4488. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1525917>
- Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V.* Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2013. V. 10. № 3. P. 603–606. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2215574>
- Mironov V.L., Roo R.D. De, Savin I.V.* Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2010. V. 48. № 6. P. 2544–2556. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2040034>
- Mironov V.L., Karavayskiy A.Y., Lukin Y.I., Molostov I.P.* A dielectric model of thawed and frozen Arctic soils considering frequency, temperature, texture and dry density // *Int. J. Remote Sens.* 2020. V. 41. № 10. P. 3845–3865. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1708506>
- Mironov V.L., Molostov I.P., Lukin Y.I., Karavayskiy A.Y.* Method of retrieving permittivity from S12 element of the waveguide scattering matrix // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). : IEEE, 2013. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2013.6693609>
- Monerris A., Vall-Ilosera M., Camps A., Sabia R., Villarino R., Cardona M., Alvarez E., Sosa S.* Soil Moisture Retrieval Using L-band Radiometry: Dependence on Soil Type and Moisture Profiles // 2006 IEEE MicroRad.: IEEE, 2006. P. 171–175. <https://doi.org/10.1109/MICRAD.2006.1677083>
- Nagarajan K., Judge J., Monsivais-Huertero A., Graham W.D.* Impact of Assimilating Passive Microwave Observations on Root-Zone Soil Moisture Under Dynamic Vegetation Conditions // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2012. V. 50. № 11. P. 4279–4291. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2191154>
- Owe M., Van de Friend A.* Comparison of soil moisture penetration depths for several bare soils at two microwave frequencies and implications for remote sensing // *WATER RESOURCES RESEARCH.* 1998. V. 34. № 9. P. 2319–2327.
- Pan M., Cai X., Chaney N.W., Entekhabi D., Wood E.F.* An initial assessment of SMAP soil moisture retrievals using high-resolution model simulations and in situ observations // *Geo-*

- phys. Res. Lett. 2016. V. 43. № 18. P. 9662–9668.
<https://doi.org/10.1002/2016GL069964>
- Pan M., Sahoo A.K., Wood E.F., Al Bitar A., Leroux D., Kerr Y.H.* An Initial Assessment of SMOS Derived Soil Moisture over the Continental United States // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2012. V. 5. № 5. P. 1448–1457.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2194477>
- Park C.-H., Behrendt A., LeDrew E., Wulfmeyer V.* New Approach for Calculating the Effective Dielectric Constant of the Moist Soil for Microwaves // Remote Sens. 2017. V. 9. P. 732.
<https://doi.org/10.3390/rs9070732>
- Park C.-H., Montzka C., Jagdhuber T., Jonard F., De Lannoy G., Hong J., Jackson T.J., Wulfmeyer V.* A dielectric mixing model accounting for soil organic matter // Vadose Zone J. 2019. V. 18 P. 190036.
<https://doi.org/10.2136/vzj2019.04.0036>
- Peplinski N.R., Ulaby F.T., Dobson M.C.* Dielectric properties of soils in the 0.3–1.3 GHz range // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. V. 33. № 3. P. 803–807.
<https://doi.org/10.1109/36.387598>
- Patil C.B., Chaudhari P.R.* Dielectric Constant and Emissivity of Forest Soil Samples at Microwave Frequency // International J. Scientific Research in Physics and Applied Sciences. 2018. V. 6. № 4. P. 44–46.
<https://doi.org/10.26438/ijsrpas/v6i4.4446>
- Reigber A., Jager M., Pinheiro M., Scheiber R., Prats P., Fischer J., Horn R., Nottensteiner A.* Performance of the P-band subsystem and the X-band interferometer of the F-SAR airborne SAR instrument // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: IEEE, 2012. P. 5037–5040.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352479>
- Sadeghi M., Tabatabaenejad A., Tuller M., Moghaddam M., Jones S.* Advancing NASA's AirMOSS P-Band Radar Root Zone Soil Moisture Retrieval Algorithm via Incorporation of Richards' Equation // Remote Sens. 2016. V. 9. № 1. P. 17.
<https://doi.org/10.3390/rs9010017>
- Savin I.V., Muzalevskiy K.V., Mironov V.L.* A dielectric model of thawed and frozen Arctic organic soils at 435 MHz // Remote Sens. Lett. 2022. V. 13. № 5. P. 452–459.
<https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2041761>
- Shen X., Walker J.P., Ye N., Wu X., Boopathi N., Yeo I.-Y., Zhang L., Zhu L.* Soil Moisture Retrieval Depth of P- and L-Band Radiometry: Predictions and Observations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2021. V. 59. № 8. P. 6814–6822.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3026384>
- Shukla J., Mintz Y.* Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate // Science (80-). 1982. V. 215. № 4539. P. 1498–1501.
<https://doi.org/10.1126/science.215.4539.1498>
- Szypłowska A., Lewandowski A., Yagihara S., Saito H., Furuhata K., Szerement J., Kafarski M., Wilczek A., Majcher J., Woszczyk A., Skierucha W.* Dielectric models for moisture determination of soils with variable organic matter content // Geoderma. 2021. V. 401. P. 115288.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115288>
- Tabatabaenejad A., Burgin M., Xueyang Duan, Moghaddam M.* P-Band Radar Retrieval of Subsurface Soil Moisture Profile as a Second-Order Polynomial: First AirMOSS Results // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. V. 53. № 2. P. 645–658.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2326839>
- Wang J.R., Schmugge T.J.* An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1980. V. GE-18. № 4. P. 288–295.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.1980.350304>
- Ye N., Walker J.P., Yeo I.-Y., Jackson T.J., Kerr Y., Kim E., Mcgrath A., Popstefanija I., Goodberlet M., Hills J.* Toward P-Band Passive Microwave Sensing of Soil Moisture // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2020. V. 18. № 3. P. 504–508.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2976204>
- Zhang L., Zhao T., Jiang L., Zhao S.* Estimate of Phase Transition Water Content in Freeze–Thaw Process Using Microwave Radiometer // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. V. 48. № 12. P. 4248–4255.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2051158>
- Zhang N., Shi J., Sun G., Guo Z., Chai L.* Assessment of boreal forest biomass using L-band radiometer SMOS data // 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2011. P. 1946–1949.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6049507>

Dielectric Model of the Upper Organic Layer of Forest Soils for a Frequency of 435 MHz

A. Yu. Karavayskiy¹ and Yu. I. Lukin¹

¹*Kirensky Institute of Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

A single-frequency refractive dielectric model is proposed for thawed and frozen forest organic soils in the root zone at 435 MHz. The dielectric model was created on the basis of the laboratory dielectric measurements of four soils with organic matter content in the range from 15 to 31%. Dielectric measurements were carried out in the range of the gravimetric moisture from 0 to 0.6 g/g and temperature range from –30 to 25°C. The coefficient of determination (R²) between the predicted and measured values of the real (ε') and imaginary (ε'') parts of the complex permittivity was 0.97. The normalized root-mean-square error was 16% and 21% for the real and imaginary parts of the complex permittivity, respectively. The created dielectric model may be applied in algorithms for remote sensing of forest soil moisture in the root zone using radar and radiometric data.

Keywords: dielectric model, moisture, temperature, organic soil, frozen soil, thawed soil

REFERENCES

- Agrokhimicheskiye metody issledovaniya pochv [Agrochemical methods of soil research] / red. Sokolov A. V. Moscow: Nauka, 1975. 656 p. (In Russian).
- Alemohammad S.H., Konings A.G., Jagdhuber T., Moghaddam M., Entekhabi D.* Characterization of vegetation and soil scattering mechanisms across different biomes using P-band SAR polarimetry // *Remote Sens. Environ.* 2018. V. 209. P. 107–117.
- Belyayeva T.A., Bobrov P.P., Kondrat'yeva O.V.* Izmeneniye dielektricheskikh svoystv svyazannoy vody v pochvakh pri uvelichenii yeye kolichestva [Changes in the dielectric properties of bound water in soils with an increase in its amount] // *Vestnik SibGAU.* 2013. № 5 (51). P. 92–95. (In Russian).
- Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V.* The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies From 10 kHz to 8 GHz—Part I: Experimental // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2022. V. 60. P. 1–9.
- Bobrov P.P., Belyayeva T.A., Kroshka Ye.S., Rodionova O.V.* O parametrakh dielektricheskoy modeli pochv, ispol'zuyemoy v algoritme SMOS [On the parameters of the dielectric soil model used in the SMOS algorithm] // *Tekhnika radiosvyazi.* 2021. V. 1(48). P. 95–102. (In Russian).
- Bobrov P.P., Kondrat'yeva O.V., Mustakova M.M.* Vliyaniye soderzhaniya organicheskogo veshchestva v pochvakh na dielektricheskuyu pronitsayemost' v diapazone chastot 10 kGts–8.5 GGts [Influence of the content of organic matter in soils on the dielectric constant in the frequency range 10 kHz–8.5 GHz] // *Vestnik SibGAU.* 2013. № 5. (51). P. 95–97. (In Russian).
- Bobrov P.P.* Spektroskopicheskaya model' dielektricheskoy pronitsayemosti pochv, ispol'zuyushchaya standartizovannyye agrofizicheskiye pokazateli [Spectroscopic model of soil dielectric permittivity using standardized agrophysical indicators] // *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa.* 2008. № 1. P. 15–23 (In Russian).
- Boyarskiy D.A., Tikhonov V.V.* Model' effektivnoy dielektricheskoy pronitsayemosti vlazhnykh i merzlykh pochv v sverkhvysokochastotnom diapazone [Model of the effective permittivity of wet and frozen soils in the microwave range] // *Radiotekhnika i elektronika.* 1995. V. 40. № 6. P. 914–917. (In Russian).
- Boyarskiy D.A., Tikhonov V.V.* Vliyaniye svyazannoy vody na dielektricheskuyu pronitsayemost' vlazhnykh i merzlykh pochv [Effect of bound water on the dielectric constant of wet and frozen soils] // 2003. (In Russian).
- Bircher S., Demontoux F., Razafindratsima S., Zakharova E., Drusch M., Wigneron J.-P., Kerr Y.H.* L-Band Relative Permittivity of Organic Soil Surface Layers—A New Dataset of Resonant Cavity Measurements and Model Evaluation // *Remote Sensing.* 2016. V. 8. № 12. P. 1024.
- Carreiras J.M.B., Quegan S., Le Toan T., Ho Tong Minh D., Saatchi S.S., Carvalhais N.* Coverage of high biomass forests by the ESA BIOMASS mission under defense restrictions // *Remote Sens. Environ.* 2017. V. 196. P. 154–162.
- Chudinova S.M.* Dielectric characteristics of soils and categories of soil water // *Eurasian Soil Sc.* 2009. V. 42. P. 405–414.
- Dobson M., Ulaby F., Hallikainen M., El-rayes M.* Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1985. V. GE-23. № 1. P. 35–46.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289498>
- Entekhabi D., Njoku E.G., O'Neill P.E., Kellogg, K.H., Crow W.T., Edelstein, W.N., Entin J.K., Goodman S.D., Jackson T.J., Johnson, J., Kimball J., Piepmeier J.R., Koster R.D., Martin N., McDonald K.C., Moghaddam M., Moran S., Reichle R., Shi J.C., Spencer M.W., Thurman S.W., Tsang L., Zyl J. Van.* The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission // *Proc. IEEE.* 2010. V. 98. № 5. P. 704–716.
- Escorihuela M.J., Chanzy A., Wigneron J.P., Kerr Y.H.* Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. № 5. P. 995–1001.
- Fomin S.V., Muzalevskiy K.* Dielectric Model for Thawed Mineral Soils at a Frequency of 435 MHz // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2021b. V. 18. № 2. P. 222–225.
- Garrison J., Lin Y.-C., Nold B., Piepmeier J.R., Vega M.A., Fritts M., Du Toit C.F., Knuble J.* Remote sensing of soil moisture using P-band signals of opportunity (SoOp): Initial results // 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): IEEE, 2017. P. 4158–4161.
- Grant J.P., de Griend A.A., Van, Wigneron J.-P., Saleh K., Panciera R., Walker J.P.* Influence of forest cover fraction on L-band soil moisture retrievals from heterogeneous pixels using multi-angular observations // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. № 5. P. 1026–1037.
- Jagdhuber T., Hajnsek I., Sauer S., Papathanassiou K.P., Bronstert A.* Soil moisture retrieval under forest using polarimetric decomposition techniques at P-band // 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2012. P. 709–712.
- Jin M., Zheng X., Jiang T., Li X., Li X.-J., Zhao K.* Evaluation and Improvement of SMOS and SMAP Soil Moisture Products for Soils with High Organic Matter over a Forested Area in Northeast China. *Remote Sensing.* 2017. V. 9. № 4. P. 387.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron, J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela, M.-J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martín-Neira M., Mecklenburg S.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE.* 2010. V. 98. № 5. P. 666–687.
- Kochetkova T.D.* Temperaturnaya zavisimost' dielektricheskoy pronitsayemosti torfa na SVCH [Temperature dependence of the dielectric permittivity of peat in the microwave] // 8-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Aktual'nyye problemy radiofiziki. 2019. Tezisy doklada. P. 196–199. (In Russian).
- Komarov A.S., Mironov V.L.* Mikrovolnovoye zondirovaniye pochv [Microwave sounding of soils. Novosibirsk] // Novosibirsk. Izd-vo SO RAN. 2000. 289 p. (In Russian).
- Liu J., Zhao S., Jiang L., Chai L., Wu F.* The influence of organic matter on soil dielectric constant at microwave frequencies (0.5–40 GHz) // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS. 2013. P. 13–16.
- Liebmann P., Wordell-Dietrich P., Kalbitz K., Mikutta R., Kalks F., Don A., Woche S.K., Dsilva L.R., Guggenberger G.* Relevance of aboveground litter for soil organic matter formation – a soil profile perspective // *Biogeosciences.* 2020. V. 17. P. 3099–3113.

- Loewer M., Igel J., Minnich C., Wagner N.* Electrical and dielectric properties of soils in the mHz to GHz frequency range // Proceedings of the 11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA). 2016. P. 247–254.
- Mandrygina V.N.* Dielektricheskaya pronitsayemost' pochv s razlichnym soderzhaniyem gumusa i vliyaniye na neye gidrofobnykh i gidrofil'nykh zagryazniteley [Dielectric permittivity of soils with different humus content and the effect of hydrophobic and hydrophilic pollutants on it] // Avtoref dis na soisk uch. step. k. f.-m. n.: Omskiy ped gos unt. 2004. 16 p. (In Russian).
- Mironov V.L., Bobrov P.P., Bobrov A.P., Mandrygina V.N., Stasuk V.D.* Microwave dielectric spectroscopy of moist soils for a forest-tundra region // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2005. P. 4485–4488.
- Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V.* Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2013. V. 10. № 3. P. 603–606.
- Mironov V.L., Komarov S.A., Rychkova N.V., Kleshchenko V.N.* Izucheniye dielektricheskikh svoystv vlazhnykh pochvo-gruntov v SVCH-diapazone [Study of the dielectric properties of wet soils in the microwave range] // Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 1994. № 4. P. 18–24. (In Russian).
- Mironov V.L., Roo R.D. De, Savin I.V.* Temperature-Dependable Microwave Dielectric Model for an Arctic Soil // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. V. 48. № 6. P. 2544–2556.
- Mironov V.L., Karavayskiy A.Y., Lukin Y.I., Molostov I.P.* A dielectric model of thawed and frozen Arctic soils considering frequency, temperature, texture and dry density // Int. J. Remote Sens. 2020. V. 41. № 10. P. 3845–3865.
- Mironov V.L., Molostov I.P., Lukin Y.I., Karavayskiy A.Y.* Method of retrieving permittivity from S12 element of the waveguide scattering matrix // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).: IEEE, 2013. P. 1–3.
- Mironov V.L., Savin I.V.* Spektroskopicheskaya mnogorelaksatsionnaya dielektricheskaya model' talykh i merylykh arkticheskikh pochv, uchityvayushchaya zavisimosti ot temperatury i soderzhaniya organicheskogo veshchestva [Spectroscopic multi-relaxation dielectric model of thawed and frozen arctic soils considering dependence on temperature and organic matter content] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2019. № 1. P. 62–73. (In Russian).
- Monerris A., Vall-Ilossera M., Camps A., Sabia R., Villarino R., Cardona M., Alvarez E., Sosa S.* Soil Moisture Retrieval Using L-band Radiometry: Dependence on Soil Type and Moisture Profiles // 2006 IEEE MicroRad.: IEEE, 2006. P. 171–175.
- Muzalevskiy K.V.* Vozmozhnosti distantsionnogo zondirovaniya profilye vlazhnosti pochv na osnove polyarimetricheskikh nablyudeniy obratnogo rasseyaniya voln v P- i C-diapazonakh chastot [Possibilities of remote sensing of soil moisture profile based on backscattering polarimetric observations in P- and C-bands] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. № 5. P. 203–216. (In Russian).
- Nagarajan K., Judge J., Monsivais-Huertero A., Graham W.D.* Impact of Assimilating Passive Microwave Observations on Root-Zone Soil Moisture Under Dynamic Vegetation Conditions // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V. 50. № 11. P. 4279–4291.
- Owe M., Van de Friend A.* Comparison of soil moisture penetration depths for several bare soils at two microwave frequencies and implications for remote sensing // WATER RESOURCES RESEARCH. 1998. V. 34. № 9. P. 2319–2327.
- Pan M., Cai X., Chaney N.W., Entekhabi D., Wood E.F.* An initial assessment of SMAP soil moisture retrievals using high-resolution model simulations and in situ observations // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. № 18. P. 9662–9668.
- Pan M., Sahoo A.K., Wood E.F., Al Bitar A., Leroux D., Kerr Y.H.* An Initial Assessment of SMOS Derived Soil Moisture over the Continental United States // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2012. V. 5. № 5. P. 1448–1457.
- Park C.-H., Behrendt A., LeDrew E., Wulfmeyer V.* New Approach for Calculating the Effective Dielectric Constant of the Moist Soil for Microwaves // Remote Sens. 2017. V. 9. P. 732.
- Park C.-H., Montzka C., Jagdhuber T., Jonard F., De Lannoy G., Hong J., Jackson T.J., Wulfmeyer V.* A dielectric mixing model accounting for soil organic matter. // Vadose Zone J. 2019. V. 18. P. 190036.
- Peplinski N.R., Ulaby F.T., Dobson M.C.* Dielectric properties of soils in the 0.3–1.3 GHz range // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. V. 33. № 3. P. 803–807.
- Patil C.B., Chaudhari P.R.* Dielectric Constant and Emissivity of Forest Soil Samples at Microwave Frequency // International J. Scientific Research in Physics and Applied Sciences. 2018. V. 6. № 4. P. 44–46.
- Reigber A., Jager M., Pinheiro M., Scheiber R., Prats P., Fischer J., Horn R., Nottensteiner A.* Performance of the P-band subsystem and the X-band interferometer of the F-SAR airborne SAR instrument // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.: IEEE, 2012. P. 5037–5040.
- Repin A.V.* Metody izmereniya dielektricheskoy pronitsayemosti razlichnykh form pochvennoy vlagi i neftesoderzhashchikh porod [Methods for measuring the dielectric permittivity of various forms of soil moisture and oil-bearing rocks] // Avtoref dis na soisk uch. step. k. f.-m. n.: Omskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet. 2010. 22 p. (In Russian).
- Sadeghi M., Tabatabaenejad A., Tuller M., Moghaddam M., Jones S.* Advancing NASA's AirMOSS P-Band Radar Root Zone Soil Moisture Retrieval Algorithm via Incorporation of Richards' Equation // Remote Sens. 2016. V. 9. № 1. P. 17.
- Savin I.V., Muzalevskiy K.V., Mironov V.L.* A dielectric model of thawed and frozen Arctic organic soils at 435 MHz // Remote Sens. Lett. 2022. V. 13. № 5. P. 452–459.
- Shen X., Walker J.P., Ye N., Wu X., Boopathi N., Yeo I.-Y., Zhang L., Zhu L.* Soil Moisture Retrieval Depth of P- and L-Band Radiometry: Predictions and Observations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2021. V. 59. № 8. P. 6814–6822.
- Shukla J., Mintz Y.* Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate // Science (80-.). 1982. V. 215. № 4539. P. 1498–1501.
- Shutko A.M.* SVCH-radiometriya vodnoy poverkhnosti i pochvo-gruntov [Microwave radiometry of the water surface and soil] // Nauka, 1986. (In Russian).

- Szypłowska A., Lewandowski A., Yagihara S., Saito H., Furuhata K., Szerement J., Kafarski M., Wilczek A., Majcher J., Woszczyk A., Skierucha W.* Dielectric models for moisture determination of soils with variable organic matter content // *Geoderma*. 2021. V. 401. P. 115288.
- Tabatabaeenejad A., Burgin M., Xueyang Duan Moghaddam M.* P-Band Radar Retrieval of Subsurface Soil Moisture Profile as a Second-Order Polynomial: First AirMOSS Results // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2015. V. 53. № 2. P. 645–658.
- Wang J.R., Schmugge T.J.* An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1980. V. GE-18. № 4. P. 288–295.
- Ye N., Walker J.P., Yeo I.-Y., Jackson T.J., Kerr Y., Kim E., Mcgrath A., Popstefanija I., Goodberlet M., Hills J.* Toward P-Band Passive Microwave Sensing of Soil Moisture // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2020. V. 18. № 3. P. 504–508.
- Zhang L., Zhao T., Jiang L., Zhao S.* Estimate of Phase Transition Water Content in Freeze–Thaw Process Using Microwave Radiometer // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2010. V. 48. № 12. P. 4248–4255.
- Zhang N., Shi J., Sun G., Guo Z., Chai L.* Assessment of boreal forest biomass using L-band radiometer SMOS data // *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2011. P. 1946–1949.