ISSN 0205-9614 Сентябрь - Октябрь 2023

Номер 5



ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

www.sciencejournals.ru



-

_

Номер 5, 2023

Методы и средства обработки	
и интерпретации космической информации	
Исследование возможностей декомпозиции H-α для двойной поляризации при радиолокационном мониторинге залесения	
А. В. Дмитриев, Т. Н. Чимитдоржиев, И. И. Кирбижекова, Ж. Д. Номшиев	3
Оценка влажности почвы по радарным данным на основе множественной регрессии	
Н. В. Родионова	13
Физические основы исследования Земли из космоса	
Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ	
Д. С. Сазонов	23
Влияние квазидвухлетней цикличности на динамику стратосферных полярных вихрей по данным спутниковых наблюдений	
В. В. Зуев, Э. А. Масленникова, Е. С. Савельева	36
Использование космической информации о Земле	
Литосферные магнитные аномалии по данным спутниковой миссии CHAMP над западным гималайским синтаксисом и окружающими территориями	
Д. Ю. Абрамова, Л. М. Абрамова	45
Выявление зон гидротермально-измененных пород с использованием данных WorldView-2 на участке Талман (Талманская площадь, юго-восточное Забайкалье, Россия)	
В. Т. Ишмухаметова, И. О. Нафигин, С. А. Устинов, Д. С. Лапаев, В. А. Минаев, В. А. Петров	58
Зависимость вегетации озимых культур от рельефа и почв на востоке Ставропольского края	
В. В. Дорошенко	71
Картографирование пахотных земель в агроландшафтах Волгоградской области по данным дистанционного зондирования	
К. П. Синельникова, А. Н. Берденгалиева, Ш. Матвеев, В. В. Балынова, А. В. Мелихова	85

-

_

No. 5, 2023

Methods and Means of Space Data Processing and Interpretation	
Investigation of the Possibilities of H- α Decomposition for Dual Polarization in Radar Monitoring of Afforestation	
A. V. Dmitriev, T. N. Chimitdorzhiev, I. I. Kirbizhekova, and Zh. D. Nomshiev	3
Soil Moisture Estimation by Radar Data Based on Multiple Regression	
N. V. Rodionova	13
Earth Research from Space Physical Ground	
Study the Possibility of Precipitation Intensity Recovery From MTVZA-GYa Measurements	
D. S. Sazonov	23
Influence of the Quasi-Biennial Oscillation on the Dynamics of the Stratospheric Polar Vortices According to Satellite Observations	
V. V. Zuev, E. A. Maslennikova, and E. S. Savelieva	36
Utilization of the Earth Space Data	
Lithospheric Magnetic Anomalies According to the CHAMP Satellite Data over the Western Himalayan Syntax and Surrounding Areas	
D. Yu. Abramova and L. M. Abramova	45
Identification of Zones of Hydrothermally Altered Rocks Using WorldView-2 Data at the Talman Site (Talmanskaya Area, South-Eastern Transbaikal, Russia)	
V. T. Ishmukhametova, I. O. Nafigin, S. A. Ustinov, D. S. Lapaev, V. A. Minaev, and V. A. Petrov	58
Dependence of the Vegetation of Winter Crops on the Relief and Soils in the East of the Stavropol Region	
V. V. Doroshenko	71
Mapping of Arable Lands in Agro-Landscapes of the Volgograd Region According to Remote Sensing Data	
K. P. Sinelnikova, A. N. Berdengalieva, Sh. Matveev, V. V. Balynova, and A. V. Melikhova	85

_____ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ _____ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ Н-а Для двойной поляризации при радиолокационном мониторинге залесения

© 2023 г. А. В. Дмитриев^{а,} *, Т. Н. Чимитдоржиев^а, И. И. Кирбижекова^а, Ж. Д. Номшиев^а

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

**E-mail: dav@ipms.bscnet.ru* Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

Оценка процессов залесения и восстановления леса после пожаров актуальна для значительной территории России, в т.ч. в связи с проблемой углеродной нейтральности. В работе рассмотрены возможности радиолокационного мониторинга процесса залесения на основе декомпозиции Клауда–Потье временных рядов данных L-диапазона с двойной поляризацией. Предварительная сегментация производится на основе минимальных значений обратного радарного рассеяния за весь период наблюдений. Это позволяет выделить в отдельный класс безлесные участки и редколесье, как существовавшие до начала исследования, так и образовавшиеся позднее. Далее выполняется поляриметрическая декомпозиция методом Клауда–Потье для получения параметров Н (энтропия) и α (угол рассеяния), и формирования из них временных рядов. Исследования показали принципиальную возможность мониторинга динамики залесения на плоскости Н-α, где точки тестовых участков образуют характерные временные треки. В качестве эталона для оценки скорости изменений на плоскости Н-α использован зрелый плотный лес, характеристики которого считаются постоянными.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, H-α разложение Клауда–Потье, двойная поляризация, временные ряды, залесение

DOI: 10.31857/S0205961423050032, EDN: XOYIPG

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных инструментов дистанционных измерений биофизических параметров леса являются поляриметрические радиолокаторы с синтезированной апертурой (PCA) (Cloude, 2009; Lee, Pottier, 2009; Moreira et al., 2013; Richards, 2009), которые позволяют получить достаточно полную информацию о состоянии и изменениях лесной растительности (Bondur et al., 2022; Dobson et al., 1992; Koyama et al., 2022, 2019; Le Toan et al., 1992; Yu, Saatchi, 2016; Бондур и др., 2019; Дмитриев и др., 2022; Чимитдоржиев и др., 2018), в т.ч. для бореальных лесов Сибири (Bondur et al., 2022; Бондур и др., 2019; Чимитдоржиев и др., 2018). Для оценки леса более эффективно использовать радиолокационные данные L-диапазона, поскольку в большинстве случаев радиолокационный эхо-сигнал проникает под лесной полог и отражается обратно от подстилающей поверхности (Bondur et al., 2022; Koyama et al., 2022, 2019; Бондур и др., 2019; Чимитдоржиев и др., 2018). При этом происходит многократное рассеяние радарного эхо-сигнала от стволов и ветвей деревьев. В случае лесного подроста, временное увеличение обратного радарного рассея-

ния в направление на радар показывает увеличение размеров и густоты молодого леса (Bondur et al., 2022; Дмитриев и др., 2022). Однако достаточно быстро возникает эффект "насыщения", выражающийся в том, что обратное рассеяние от лесной среды возрастает до некоторого предела, до определенной величины надземной биомассы леса, и в дальнейшем перестает расти. Например, для хвойного леса в Р-диапазоне это 200 тонн/га (Dobson et al., 1992), в L-диапазоне 100 т/га (Dobson et al., 1992; Le Toan et al., 1992; Yu and Saatchi, 2016). Тем не менее рост деревьев (увеличение биомассы) может продолжаться, хотя уже и не такой интенсивный. Так, ранее авторами в (Дмитриев и др., 2022), на примере соснового подроста, было показано устойчивое возрастание величины обратного радиолокационного рассеяния неоднородностями леса на согласованной горизонтальной поляризации в L-диапазоне длин волн и последующее "насыщение". В тоже время соответствующий тренд для кросс-поляризации не достиг уровня контрольного участка зрелого леса, что объясняется различием в механизмах рассеяния радарного сигнала на неоднородностях лесного полога (стволы и ветви) на различных поляризациях. Этот результат, подтверждающий классические зависимости величины эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) от биомассы (Dobson et al., 1992; Le Toan et al., 1992; Yu and Saatchi, 2016), показывает необходимость совместного анализа поляриметрических данных.

К настоящему времени разработано множество методов и алгоритмов анализа полностью поляриметрических радарных изображений (Cloude and Pottier, 1997; Freeman, 2007; Freeman and Durden, 1998; Krogager et al., 1997; Touzi, 2007; Yamaguchi et al., 2005). Эти методы показали высокую эффективность при количественных измерениях биофизических параметров леса. К сожалению, полностью поляриметрический режим радиолокационного зондирования используется достаточно редко. Так, в случае космическим радиолокатором ALOS-2 PALSAR-2 (L-диапазон) глобальная съемка в полностью поляриметрическом режиме проводится один раз в 5 лет, что в лучшем случае дает только два изображения на текущий момент времени. Более распространен режим съемки с двойной поляризацией, как правило на согласованной горизонтальной (НН) или вертикальной (VV), и одним из соответствующих вариантов кросс-поляризации (HV или VH). Такой режим радиолокационного зондирования экономичнее с точки зрения объема данных и площади покрытия (полоса обзора шире). Однако существенно снижается информативность и количество поляриметрических декомпозиций, пригодных для анализа. В известной нам литературе, для радарных изображений с двойной поляризацией предложена только декомпозиция Клауд-Потье (Cloude, 2007), в литературе и программных продуктах именуемая как декомпозиция Η-α. Однако, как было показано в работе (Ji, Wu, 2015) классификация природных объектов по физическим механизмам рассеяния малоэффективна для режимов съемки с двойной поляризацией (HH-HV или VV-VH).

Тем не менее, можно предположить, что с ростом лесной растительности параметры H и α разложения Клауда—Потье будут также последовательно расти вдоль кривой, ограничивающей область их допустимых значений. Это позволит обнаружить и оценить динамику роста лесного молодняка с помощью данных с двойной поляризацией. Данный подход был использован в работе (Guo et al., 2018), в которой декомпозиция Клауда—Потье данных PCA Sentinel-1 (С-диапазон, длина волны 5.6 см) с двойной поляризацией VV-VH была использована с целью извлечения дополнительного параметра, позволившего провести классификацию с обучением для различных сельскохозяйственных культур.

Целью данной работы является оценка возможностей декомпозиции Клауда-Потье спутниковых радиолокационных данных с двойной поляризацией НН и HV в L-диапазоне длин волн для мониторинга залесения/лесовосстановления.

ОПИСАНИЕ ТЕСТОВОГО ПОЛИГОНА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве тестового полигона использован участок залесения сосновыми насаждениями в прибрежной части озера Байкал (рис. 1). Он относится к категории земель сельскохозяйственного назначения. Его подробное описание приведено в работе (Дмитриев и др., 2022). В последние десятилетия прошлого века данная местность не обрабатывалась. С начала 2000-х гг. начался интенсивный рост соснового молодняка, состояние которого на лето 2007 г., показано на рис. 1. Красному цвету на рис. 1 соответствует спектральное отражение в 4 канале (NIR) мультиспектральной камеры AVNIR-2 спутника ALOS-1 (пространственное разрешение 10 м), зеленому цвету – во 2 канале, синему цвету – в 1 канале. Соответственно, подрост хвойных пород выделяется ярко-красным цветом на фоне темно-красного зрелого соснового леса.

Для исследования использованы временные ряды данных спутниковых радиолокаторов ALOS-1 PALSAR-1 (2007-2010 гг.) и ALOS-2 PALSAR-2 (2015–2020 гг.) на восходящей орбите в режиме FBD (Fine Beam Dual, разрешение 10 м/пиксель) на согласованной горизонтальной (НН) и кросс-поляризациях (HV), полученные в сезон положительных среднесуточных температур. Изображения получены в L-диапазоне (длина волны излучения 24 см). Углы падения составляли 37.2° и 33.2° для PALSAR-1 и PALSAR-2 соответственно. Список использованных изображений приведен в табл. 1. Последние цифры в идентификаторе сцены ALOS-2 PALSAR-2 обозначают дату съемки в формате: первые две цифры обозначают год, следующие две цифры месяц, последние – день месяца. Вследствие значительного влияния влажности земных покровов на обратное отражение радиолокаторов, табл. 1 дополнена данными об осадках в день съемки (ERA5 Daily Aggregates, 2023), полученными из каталога Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

ВЫДЕЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ЛЕСНОГО ПОДРОСТА ПО СТЕПЕНИ ПЛОТНОСТИ ДРЕВОСТОЯ

Как было показано ранее в (Дмитриев и др., 2022), залесение тестового полигона происходило неравномерно, что визуально можно наблюдать и на рис. 1. Первой интенсивно начала зарастать восточная часть – Участок 1, обозначенная синим полигоном на рис. 2, *а*. Затем – западная часть, на которой наблюдается различие в плотности мо-



Рис. 1. Расположение тестового полигона и его состояние на изображении мультиспектральной камеры ALOS-1 AVNIR-2 от 16.07.2007 г. (каналы 4-2-1).

лодняка, а также наличие не зарастающих мест. Поэтому, для уменьшения ошибок при поляриметрическом анализе лесного подроста, необходимо предварительно сегментировать тестовый полигон, по возможности исключая безлесные участки. Для этого было получено и проанализировано изображение, значения пикселов которого представляли собой минимальные значения интенсивности обратного радарного рассеяния на кросс-поляризации из всего временного ряда данных, представленных в табл. 1. Это позволило выделить в один класс пикселы с наиболее низкими величинами обратного радарного рассеяния – безлесные участки, которые затем были исключены из рассмотрения. В другой класс попадают фрагменты с наибольшими значениями обратного радарного рассеяния — молодой плотный лес, расположенный в западной части тестового полигона (Участок 2 – пурпурные полигоны). Также выделяется класс с промежуточными величинами минимальной интенсивности, представляющий собой лесной подрост, не формирующий сплошной полог, т.е. редколесье (Участок 3 – желтые полигоны). Результаты сегментации представлены на рис. 2, *а*. В качестве контрольного участка для сравнения также будем использовать фрагмент зрелого плотного леса, который оставался неизменным на всем протяжении периода наблюдений (Участок 4, синий контур).

Для валидации результатов сегментации был дополнительно проведен анализ изменения индекса NDVI за период между 2007 и 2020 гг. С помощью функционала Google Earth Engine по данным Landsat-5, -8 было получено изображение (см. рис. 2, δ), представляющее собой разность усредненных 32-дневных значений NDVI, взятых в зимний сезон 2020 г. и аналогичный сезон 2007 г. Зимний сезон был выбран с целью оценки динамики роста только хвойных насаждений. В целом, результаты анализа вегетационного индекса согласуются с результатами анализа обратного радарного рассеяния.

ALOS-1 PALSAR-	l	ALOS-2 PALSAR-2		
Идентификатор сцены/Дата	Осадки	Идентификатор сцены	Осадки	
ALPSRP077831030/2007-07-11	_	ALOS2014871030-140901	_	
ALPSRP084541030/2007-08-26	_	ALOS2068691030-150831	_	
ALPSRP091251030/2007-10-11	_	ALOS2122511030-160829	_	
ALPSRP124801030/2008-05-28	_	ALOS2176331030-170828	_	
ALPSRP131511030/2008-07-13	_	ALOS2226011030-180730	_	
ALPSRP138221030/2008-08-28	Морось	ALOS2279831030-190729	Морось	
ALPSRP185191030/2009-07-16	—	ALOS2327441030-200615	_	
ALPSRP191901030/2009-08-31	_			
ALPSRP198611030/2009-10-16	Морось			
ALPSRP238871030/2010-07-19	—			
ALPSRP245581030/2010-09-03	_			

Таблица 1. Радиолокационные данные ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2

ДЕКОМПОЗИЦИЯ КЛАУДА-ПОТЬЕ

Физической основой радиолокационной поляриметрии является зависимость поляризационного состояния радарного сигнала от физического механизма обратного рассеяния земными объектами. Как правило, поляриметрические данные представлены в виде многоканального изображения, в каждом канале которого находится один из элементов матрицы рассеяния. С помощью матрицы рассеяния можно полностью описать детерминированные (точечные) рассеиватели, которые изменяют поляризацию падающей волны. Однако для распределенных по площади рассеивателей этого сделать невозможно. Поэтому были разработаны различные методы ее разложения (декомпозиции), основной целью которых является представление отраженного от распределенной цели радиолокационного сигнала в виде вкладов элементарных механизмов рассеяния (Cloude, Pottier, 1997; Freeman, Durden, 1998; Krogager et al., 1997; Touzi, 2007; Yamaguchi et al., 2005). Например, такими механизмами являются однократное (от поверхности), объемное (от разнонаправленных неоднородностей растительности) и двухкратное (последовательно от вертикальной структуры затем от поверхности, а также в обратном порядке — от поверхности и затем от структуры, ориентированной вертикально).

Метод Клауда–Потье (Cloude, Pottier, 1997) является математической моделью, которая для данных с полной поляризацией выявляет основной механизм рассеяния из восьми возможных типов. Типы выделяются в соответствии со значе-



Рис. 2. Результаты сегментации тестового полигона: a – по значениям интенсивности обратного радарного рассеяния; δ – относительный рост нормализованного вегетационного индекса за период наблюдений.





Рис. 3. Расположение основных механизмов рассеяния в плоскости H-α (при минимальных величинах энтропии) для полной и двойной поляризации. *a* – полная поляризация; *б* – HH-VV; *в* – HH-HV; *г* – HV-VV. Источник (Ji, Wu, 2015).

ниями параметрического угла α и энтропии H, получаемыми из собственных значений матрицы когерентности. Метод Клауда–Потье широко применяется для интерпретации, классификации и сегментации радиолокационных данных.

Применение метода Клауда-Потье для случая двойной поляризации впервые было дано в (Cloude, 2007), однако в данной работе не было приведено деление на зоны в плоскости Η-α. Это было сделано позднее в (Ji, Wu, 2015), в которой показано расположение основных механизмов рассеяния в плоскости Η-α (при минимальных величинах энтропии) для полной и двойной поляризации (рис. 3). Как можно заметить на рис. 3. для двойных поляризаций HH-HV и HV-VV основные механизмы рассеяния не различаются. Более того, в отличие от случая с полной поляризацией, когда границы между зонами на плоскости Η-α точно разделяют механизмы рассеяния, в случае с двойной поляризацией зоны перекрываются между собой, а границы сильно размыты. Последнее является причиной того, что однозначная классификация по физическим механизмам рассеяния для случая двойной поляризации не возможна. Однако, как указывалось выше, возможна оценка динамики сельскохозяйственных посевов в С-диапазоне длин волн (Guo et al.. 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ КЛАУДА-ПОТЬЕ ДАННЫХ С ДВОЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Рассмотрим результаты анализа временного ряда данных радаров ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2 с согласованной горизонтальной и кросс-поляризациями. Предварительная обработка (импорт, калибровка, фильтрация спекл-шума) и декомпозиция Клауда–Потье были выполнены в программном обеспечении SNAP (SNAP, 2023). Как и следовало ожидать с учетом работы (Ji, Wu, 2015), расположение результатов декомпозиции на плоскости H-α всех имеющихся данных (18 изображений, см. табл. 1) показало существенное взаимное перекрытие. Поэтому для предварительного анализа изменений на тестовых участках результаты применения декомпозиции представлены только за две даты: 11 июля 2007 г. (синий цвет на рис. 4, $a-4 \ e$) и 15 июня 2020 г. (оранжевый цвет на рис. 4, $a-4 \ e$). Границы зон в плоскости H- α представлены для случая двойной поляризации в соответствие с (Ji, Wu, 2015).

В целом, представленный на рис. 4, результат показывает отсутствие значительных изменений механизмов радарного рассеяния для всех трех участков, несмотря на значительное увеличение NDVI (см. рис. 2, б) с 2007 по 2020 г. Это связано в том числе с обнаруженным в работе (Ji, Wu, 2015) эффектом смешивания физических механизмов рассеяния и соответственно отсутствием четких границ в отличие от варианта декомпозиции полностью поляриметрических радиолокационных данных. Однако, на указанном временном интервале изменения поляриметрических характеристик сравнимы с флуктуациями облака точек тестовых участков. Поэтому проанализирустатистические характеристики тестовых участков для результатов, показанных на рис. 4. Для этого определим средние величины, стандартное отклонение И вариативность S $Var(x) = (S_x/\overline{x}) \times 100\%$ на участках 1—4 (см. табл. 2). Результаты, представленные в табл. 2 показывают, что энтропия на участках лесного подроста в среднем возросла на 0.08-0.11, на контрольном участке (зрелый лес) на 0.07. Величины разброса (стандартное отклонение и вариативность) наоборот снизились на 0.004-0.037 и на 2-6% соответственно, а на контрольном участке не претерпели изменений. Параметр α также демонстрирует увеличение средних значений на 3.11°-4.63° на участках лесного подроста и на 4.72° на участке зрелого леса.

Для проверки значимости изменений двух средних больших выборок с известными дисперсиями (т.е. изменений на тестовых участках с 2007 по 2020 г.), а также изменений дисперсии в мате-



Рис. 4. Результаты декомпозиции для участков залесения *a* – Участок 1; *б* – Участок 2; *в* – Участок 3.

матической статистике используются значения статистического критерия $Z_{\text{расч}}$ и критерия Фишера $F_{\text{расч}}$, которые определяются по следующим формулам:

$$Z_{\text{pacy}} = \frac{\left|\overline{x} - \overline{y}\right|}{\sqrt{S_x^2/n_x + S_y^2/n_y}}, \ F_{\text{pacy}} = \frac{S_x^2}{S_y^2},$$

где \overline{x} и \overline{y} — выборочные средние значения, S_x и S_y – стандартные отклонения выборок, n_x и n_y – количество элементов в выборках.

Изменения считаются статистически значимыми при выполнении следующих условий (уровень значимости 0.05):

$$Z_{\text{pacy}} > Z_{\text{крит}} = 1.96; \ F_{\text{pacy}} > F_{\text{крит}}.$$

Как видно по табл. 2 значимость увеличения средних значений и уменьшение дисперсии энтропии Н наблюдается для всех участков за исключением контрольного Участка 4. На Участках 1 и 3 также наблюдается значимое снижение величины разброса и вариации параметра α (на 0.44–1.33 и 5–10% соответственно). На 2-м и 4-м участ-

Таблица 2. Среднее значение, стандартное отклонение и вариативность параметров H и α , а также оценка их значимости

	Участок 1		Участок 2		Участок 3		Участок 4	
	2007	2020	2007	2020	2007	2020	2007	2020
Число пикселей	53	09	69	037	68	38	72	25
			Энтро	опия Н				
Среднее значение	0.65	0.73	0.63	0.74	0.66	0.75	0.81	0.88
Стандартное	0.078	0.066	0.068	0.064	0.084	0.047	0.035	0.034
отклонение								
<i>Var</i> (H)	12%	9%	11%	9%	13%	6%	4%	4%
Проверка значимости различия средних значений и дисперсий Н при уровне значимости 0.05								
$Z_{\rm pacy}/Z_{\rm kput}$	57.1,	/1.96	98.1	/1.96	77.3,	/1.96	38.6	/1.96
$F_{\rm pacч}/F_{\rm крит}$	1.40,	/1.05	1.13,	/1.04	3.19,	/1.04	1.06	/1.13
	•		Пара	метр α			•	
Среднее значение, °	17.46	20.57	16.41	21.04	18.12	21.84	24.98	29.70
Стандартное откло- нение, °	3.57	3.13	2.88	3.01	3.81	2.48	2.17	2.47
$Var(\alpha)$	20%	15%	18%	14%	21%	11%	9%	8%
Проверка зна	ачимости ра	азличия сре	дних значе	ний и диспе	ерсий α при	и уровне зна	ачимости 0.	05
$Z_{\rm pacy}/Z_{\rm kput}$	47.7,	/1.96	92.6	/1.96	67.7,	/1.96	38.6	/1.96
$F_{\rm pacy}/F_{\rm крит}$	1.30,	/1.05	1.05	/1.04	2.36	/1.04	1.14	/1.13



Рис. 5. Результаты декомпозиции временного ряда 2007–2020 гг.: а – Участок 1; б – Участок 2; в – Участок 3.

ках видно слабое увеличение величины разброса и вариации на 0.13—0.30 и на 0—3% соответственно. Проверка роста дисперсии посредством снижения уровня значимости до 0.01 показала, что критические значения критерии Фишера увеличиваются до 1.06 и 1.19 для 2-го и 4-го участков соответственно, при этом условия значимости увеличения дисперсии на этих участках нарушается. Во остальных случаях значимость не изменилась.

Статистика, приведенная в табл. 2 позволяет утверждать, что достаточно равномерно по всем участкам увеличилась хаотичность (энтропия) обратного радарного рассеяния, что является признаком увеличения количества и размера неоднородностей (стволов и ветвей) соизмеримых с длиной волны радиолокационного эхо-сигнала. Стандартное отклонение для энтропии уменьшается для всех участков лесного подроста, что указывает на уменьшение разнообразия характеристик участков залесения. Так это, например, может показывать уменьшение количества и/или площади безлесных фрагментов и редколесья, т.е. vчастки к 2020 г. более равномерно заросли молодыми насаждениями. В целом такое сравнение достаточно информативно и демонстрирует возможности декомпозиции при рассмотрении усредненных величин.

Рассмотрим теперь усредненные в пределах каждого тестового участка результаты декомпозиции Клауда–Потье, предполагая, что это позволит избежать многочисленных наложений/перекрытий множества точек, полученных для каждой даты рассматриваемого временного ряда (см. табл. 1). Результаты декомпозиции представлены на рис. 5. На всех графиках красным ромбом выделено среднее (за 2007–2020 гг.) значение для контрольного Участка 4. Это значение является некоторым эталоном, к которому постепенно смещаются средние значения энтропии и угла α лесного подроста. Как можно заметить, усредненные значения для контрольного лесного участка расположены в зоне Z4 (шероховатая поверхность). что противоречит установленному разграничению зон (Ji, Wu, 2015) для декомопозиции с двойной поляризацией в плоскости Η-α. Зрелый лес, как правило, объемно рассеивает радиолокационный эхо-сигнал. Соответственно, результаты декомпозиции для зрелого леса должны располагаться в зонах Z5 и Z8 (случайно ориентированные диполи), чего не наблюдается. Вместе с тем на рис. 5 отмечается определенная динамика при использовании средних величин: со временем отмечается переход из зоны Z1 (слабо шероховатая поверхность) в Z4 (шероховатая поверхность). Подобный результат получен в (Guo et al., 2018) для оценки роста сельскохозяйственных посевов по данным С-диапазона с двойной согласованной вертикальной и кроссполяризациями. Таким образом можно утверждать, что наблюдаемая на рис. 5 динамика изменений параметров Η-α показывает увеличение размеров элементов молодого подроста, соизмеримых с длиной волны L-диапазона, а также их количества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов поляриметрической декомпозиции Клауда–Потье радиолокационных данных L-диапазона с двойной поляризацией за 11 июля 2007 г. и 15 июня 2020 г. показал, что мониторинг залесения/лесовосстановления на основе классификации по физическим механизмам рассеяния на плоскости H- α невозможен. Поэтому была выполнена статистическая оценка изменений усредненных параметров разложения (энтропии и угла α) за указанные даты. Эти усредненные параметры показывают значимый рост (уровень значимости 0.05) за период наблюдения. Рассмотрение временного ряда таких средних значений для трех тестовых участков залесения на плоскости H- α выявило следующее: с одной сто-

роны, возможна качественная оценка динамики для всех участков, с другой стороны, все три участка, которые относятся по своим отражательным характеристикам к различным классам залесения, демонстрируют сходную динамику по отношению к участку зрелого плотного леса, принятого в качестве контрольного. Вместе с тем следует отметить, что среднее значение для зрелого леса располагается в зоне. соответствующей физическому механизму рассеяния от шероховатой поверхности, вместо зоны с механизмом объемного, в результате многократных переотражений стволами и ветвями деревьев, рассеяния. Это несоответствие позволяет сделать вывод, что предложенное в работе (Ji, Wu, 2015) разделение на зоны различных физических механизмов рассеяния не корректно применительно к оценке лесной среды по данным L-диапазона длин волн. В целом, поляриметрическая декомпозиция Клауда-Потье для случая двойной поляризации совместно со статистическим анализом позволяет уверенно выявить динамику залесения/лесовосстановления.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-27-20081.

Данные ALOS-1, -2 PALSAR-1, -2 предоставлены японским аэрокосмическим агентством JAXA в 2018–2021 гг. в соответствии с проектом ALOS-2 RA6 (PI: 3092).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н. Оптико-микроволновая диагностика восстановления леса после пожаров // Вычислительные Технологии. 2022. Т. 27. № 2. С. 105–121.

https://doi.org/10.25743/ICT.2022.27.2.009

Дмитриев А.В., Чимитдоржиев Т.Н., Добрынин С.И., Худайбердиева О.А., Кирбижекова И.И. Оптико-микроволновая диагностика залесения сельскохозяйственных земель // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 168–180.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180

Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Кирбижекова И.И., Шерхоева А.А., Балтухаев А.К., Дагуров П.Н. Дистанционные оптико-микроволновые измерения параметров леса: современное состояние исследований и экспериментальная оценка возможностей // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. Т. 15. № 4. С. 9–26. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Kirbizhekova I.I., Dmitriev A.V. Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series // Forests. V. 13. № 5. P. 814. https://doi.org/10.3390/f13050814

Cloude S.R. Polarisation: Applications in Remote Sensing. OUP Oxford. 2009. 466 p.

Cloude S.R. The dual polarisation entropy/alpha decomposition: a PALSAR case study // Proc. 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency. 2007. P. 6.

Cloude S.R., Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. V. 35. № 1. P. 68–78. https://doi.org/10.1109/36.551935

Dobson M.C., Ulaby F.T., LeToan T., Beaudoin A., Kasischke E.S., Christensen N. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992. V. 30. № 2. P. 412–415.

https://doi.org/10.1109/36.134090

ERA5 Daily Aggregates [Электронный ресурс], URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF ERA5 DAILY (дата обращения 11 мая 2023).

Freeman A. Fitting a Two-Component Scattering Model to Polarimetric SAR Data From Forests // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45. № 8. P. 2583–2592. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.897929

Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36. № 3. P. 963–973. https://doi.org/10.1109/36.673687

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27.

https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Guo J., Wei P.-L., Liu J., Jin B., Su B.-F., Zhou Z.-S. Crop Classification Based on Differential Characteristics of H/ α Scattering Parameters for Multitemporal Quad- and Dual-Polarization SAR Images // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018. V. 56. No 10. P. 6111–6123.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2832054

Ji K., Wu Y. Scattering Mechanism Extraction by a Modified Cloude-Pottier Decomposition for Dual Polarization SAR // Remote Sensing. 2015. V. 7. № 6. P. 7447–7470. https://doi.org/10.3390/rs70607447

Koyama C.N., Shimada M., Watanabe M., Tadono T. ALOS-2/PALSAR-2 Long-term Pantropical Observation – A Paradigm Shift in Global Forest Monitoring // Proc. 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EU-SAR 2022). 2022. P. 1–5.

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. № 111372. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111372

Krogager E., Boerner W.-M., Madsen S.N. Feature-motivated Sinclair matrix (sphere/diplane/helix) decomposition and its application to target sorting for land feature classification // Proc. SPIE 3120, Wideband Interferometric Sensing and Imaging Polarimetry, (23 December 1997). P. 144–154. https://doi.org/10.1117/12.300620

Le Toan T., Beaudoin A., Riom J., Guyon D. Relating forest biomass to SAR data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.

V. 30. № 2. P. 403–411. https://doi.org/10.1109/36.134089

Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications, Optical science and engineering. CRC Press, Boca Raton. 2009. 440 p.

Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K.P. A tutorial on synthetic aperture radar // IEEE Geosci. Remote Sens. Magazine. 2013. V. 1. № 1. P. 6–43.

https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301

Richards J.A. Remote Sensing with Imaging Radar. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2009. 361 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02020-9 SNAP [Электронный ресурс], URL: http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/ (дата обращения 11 мая 2023). *Touzi R*. Target Scattering Decomposition in Terms of Roll-Invariant Target Parameters // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45. № 1. Р. 73–84.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.886176

Yamaguchi Y., Moriyama T., Ishido M., Yamada H. Fourcomponent scattering model for polarimetric SAR image decomposition // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. V. 43. № 8. P. 1699–1706.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.852084

Yu Y., Saatchi S. Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests // Remote Sensing. 2016. V. 8. № 6. P. 522. https://doi.org/10.3390/rs8060522

Investigation of the Possibilities of H- α Decomposition for Dual Polarization in Radar Monitoring of Afforestation

A. V. Dmitriev¹, T. N. Chimitdorzhiev¹, I. I. Kirbizhekova¹, and Zh. D. Nomshiev¹

¹Institute of Physical Materials Science, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Assessment of the processes of afforestation and restoration of forests after fires is relevant for a significant territory of Russia, including the problem of carbon neutrality. The paper considers the possibilities of radar monitoring of the afforestation process based on the Cloud-Pottier decomposition of L-band data time series with dual polarization. Preliminary segmentation is based on the minimum values of the radar backscatter over the entire observation period. This makes it possible to distinguish treeless areas and sparsely wooded areas into a separate class, both existing before the start of the study and formed later. Next, Cloud-Pottier polarimetric decomposition is performed to obtain the parameters H (entropy) and α (scattering angle) and form time series from them. Studies have shown the principal possibility of afforestation dynamics monitoring on the H- α plane, where the points of the test areas form characteristic time tracks. A mature dense forest, whose characteristics are considered permanent, was used as a reference for estimating the changes rate on the H- α plane.

Keywords: satellite radar, Cloude-Pottier H-a decomposition, dual polarization, time series, afforestation

REFERENCES

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Spatial Anisotropy Assessment of the Forest Vegetation Heterogeneity at Different Azimuth Angles of Radar Polarimetric Sensing // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2019. V. 55. № 9. P. 926–934.

https://doi.org/10.1134/S0001433819090093

Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Dagurov P.N. Optikomikrovolnovaya diagnostika vosstanovleniya lesa posle pozharov [Optics and microwave detection of forest restoration after fires] // Computational Technologies. 2022. V. 27. № 2. P. 105–121. (In Russian). https://doi.org/10.25743/ICT.2022.27.2.009_

Dmitriev A.V., Chimitdorzhiev T.N., Dobrynin S.I., Khudaiberdieva O.A., Kirbizhekova I.I. Optiko-mikrovolnovaya diagnostika zaleseniya sel'skokhozyaistvennykh zemel' [Opticalmicrowave diagnostics of agricultural land afforestation] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 4. P. 168–180. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-168-180

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 5 2023

Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Kirbizhekova I.I., Sherkhoeva A.A., Baltukhaev A.K., Dagurov P.N. Distantsionnye optiko-mikrovolnovye izmereniya parametrov lesa: sovremennoe sostoyanie issledovanii i eksperimental'naya otsenka vozmozhnostei [Remote optical-microwave measurements of forest parameters: modern state of research and experimental assessment of potentials] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. V. 15. № 4. C. 9–26. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-9-24

Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Kirbizhekova I.I., Dmitriev A.V. Estimation of Postfire Reforestation with SAR Polarimetry and NDVI Time Series // Forests. V. 13. № 5. P. 814.

https://doi.org/10.3390/f13050814

Cloude S.R. Polarisation: Applications in Remote Sensing. OUP Oxford. 2009. 466 p.

Cloude S.R. The dual polarisation entropy/alpha decomposition: a PALSAR case study // Proc. 3rd International Workshop on Science and Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency. 2007. P. 6. *Cloude S.R., Pottier E.* An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. V. 35. № 1. P. 68–78. https://doi.org/10.1109/36.551935

Dobson M.C., Ulaby F.T., LeToan T., Beaudoin A., Kasischke E.S., Christensen N. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992. V. 30. № 2. P. 412–415. https://doi.org/10.1109/36.134090

ERA5 Daily Aggregates, available at https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECM-WF_ERA5_DAILY (Accessed: May 11, 2023).

Freeman A. Fitting a Two-Component Scattering Model to Polarimetric SAR Data From Forests // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45. № 8. P. 2583–2592. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.897929

Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36. № 3. P. 963–973. https://doi.org/10.1109/36.673687

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27.

https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Guo J., Wei P.-L., Liu J., Jin B., Su B.-F., Zhou Z.-S. Crop Classification Based on Differential Characteristics of H/α Scattering Parameters for Multitemporal Quad- and Dual-Polarization SAR Images // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018. V. 56. No 10. P. 6111–6123.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2832054

Ji K., Wu Y. Scattering Mechanism Extraction by a Modified Cloude-Pottier Decomposition for Dual Polarization SAR // Remote Sensing. 2015. V. 7. № 6. P. 7447–7470. https://doi.org/10.3390/rs70607447

Koyama C.N., Shimada M., Watanabe M., Tadono T. ALOS-2/PALSAR-2 Long-term Pantropical Observation – A Paradigm Shift in Global Forest Monitoring // Proc. 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EU-SAR 2022). 2022. P. 1–5.

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. № 111372. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111372

Krogager E., Boerner W.-M., Madsen S.N. Feature-motivated Sinclair matrix (sphere/diplane/helix) decomposition and its application to target sorting for land feature classifi-

cation // Proc. SPIE 3120, Wideband Interferometric Sensing and Imaging Polarimetry, (23 December 1997). P. 144–154. https://doi.org/10.1117/12.300620

Le Toan T., Beaudoin A., Riom J., Guyon D. Relating forest biomass to SAR data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. V. 30. № 2. P. 403–411.

https://doi.org/10.1109/36.134089

Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications, Optical science and engineering. CRC Press, Boca Raton. 2009. 440 p.

Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K.P. A tutorial on synthetic aperture radar // IEEE Geosci. Remote Sens. Magazine. 2013. V. 1. № 1. P. 6–43.

https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301

Richards J.A. Remote Sensing with Imaging Radar. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2009. 361 p.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-02020-9

SNAP, available at http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/ (Accessed: May 11, 2023).

Touzi R. Target Scattering Decomposition in Terms of Roll-Invariant Target Parameters // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45. \mathbb{N} 1. P. 73–84.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.886176

Yamaguchi Y., Moriyama T., Ishido M., Yamada H. Fourcomponent scattering model for polarimetric SAR image decomposition // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2005. V. 43. № 8. P. 1699–1706.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.852084

Yu Y, Saatchi S. Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests // Remote Sensing, 2016. V. 8. N \bigcirc 6. P. 522.

https://doi.org/10.3390/rs8060522

_____ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ _____ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПО РАДАРНЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ

© 2023 г. Н.В. Родионова*

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Московская обл., Фрязино, Россия *E-mail: rnv1948123@yandex.ru Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

Задача оценки влажности почвы дистанционными (спутниковыми) методами остается актуальной вплоть до настоящего времени. Для оценки влажности почвы в работе построены регрессионные модели на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями влажности почвы. В качестве наземных выбраны измерения на двух станциях в Германии (Falkenberg и Gevenich), входящих в всемирную сеть данных по влажности почвы ISMN (International Soil Moisture Network). В качестве радарных используются данные спутника Sentinel-1. Построены множественные регрессии с коэффициентом детерминации до 0.91. Предлагается использовать в регрессиях не только радарные, но и метеоданные, что позволяет увеличить коэффициент детерминации и уменьшить стандартную ошибку регрессии. Для возможного распространения регрессий, полученных для одной территории, на другую территорию, в работе предложены два критерия: близость значений гидротермального коэффициента Селянинова (ГТК) и схожесть текстуры почвы. По этим условиям выбраны две станции в Рязанской области и Калмыкии, архивная информация которых по влажности почвы ISMN до 1998 г. Каждая из выбранных станций удовлетворяет только одному из выбранных критериев.

Ключевые слова: наземные и спутниковые измерения, объемная влажность почвы, коэффициент корреляции Спирмена, множественная регрессия, ГТК, почвенная текстура **DOI:** 10.31857/S0205961423050068, **EDN:** XDTCXU

ВВЕДЕНИЕ

Задача оценки влажности почвы дистанционными (спутниковыми) методами остается актуальной вплоть до настоящего времени, особенно для обширной территории России.

Методы восстановления влажности почвы по радарным данным могут быть классифицированы на три типа:

основанные на использовании аналитических моделей, подобных AIEM (Advanced Integrated Equation Model) (Wu et al., 2001; Chen et al., 2003); могут быть сложными и их трудно инвертировать;

– полуэмпирические модели, например, модели
 Oh (1992) и Dubois (1995), которые имеют форму,
 учитывающую некоторые электромагнитные
 свойства среды, но упрощены с помощью эмпирически полученных параметров;

– чисто эмпирические модели, такие как модели, основанные на регрессии (Beale et al., 2019).

Данная работа посвящена построению регрессионных моделей на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями объемной влажности почвы. При наличии высокой корреляции строится регрессия, позволяющая с той или иной точностью оценить по радарным данным объемную влажность почвы на определенной территории, а также на других территориях при близких параметрах текстуры почвы, напочвенного покрова и климатических условий. Но есть проблема в том, что радарных данных с высоким пространственным разрешением в настоящее время имеется достаточное количество, а наземных измерений влажности почвы для территории России – только единичные локальные данные и, как правило, не в открытом доступе. Во всемирной сети ISMN (https://ismn.geo.tuwien.ac.at/) информация о наземных измерениях по станциям России ограничивается в лучшем случае 1998 г. В августе 2022 г. появилась информация ISMN об обновлении данных российской сети Ru CFR по 2021 г. для двух станций Федоровское (Тверская область). Правда, территории расположения обеих станций имеют древесный покров (NDVI ~ 0.9). что нивелирует возможность установить корреляцию радарных данных с влажностью почвы, поскольку сигнал радара взаимодействует как с кроной деревьев, так и с почвой (в зависимости от сплоченности леса и длины волны).



Рис. 1. Место расположения станции Falkenberg.

В данной работе рассмотрена корреляционная связь между наземными измерениями влажности почвы на двух станциях сети ISMN MOL-RAO Falkenberg (Германия) и TERENO Gevenich (Германия), и находящимися в открытом доступе радарными данными Sentinel-1 (https://earthdata.nasa.gov/)). Построены регрессионные модели, и сделана попытка распространить множественные регрессии на две станции со схожими климатическими условиями и текстурой почвы в Калмыкии и Рязанской области.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Falkenberg. Станция Falkenberg (Германия, 120 км к югу от Берлина) сети ISMN MOL-RAO имеет координаты 52.16694° с.ш., 14.12417° в.д. Расположение станции показано на рис. 1 (справа внизу, указано красной стрелкой). Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение 0.43 (м³ м⁻³), глина – 6%, песок – 73%, ил – 21%, organic carbon – 0.9%, пастбища/сельхозугодья/трава. В наземные измерения входят осадки (*Pr*), температура воздуха (*Ta*), влажность почвы (sm) на глубине 8, 15, 30, 45 и 90 см, температура почвы (*Ts*) на глубине 5, 10,15, 20, 30, 45, 50, 60, 90, 100, 120, 150 см.

В качестве радарных в работе использовались находящиеся в открытом доступе Sentinel-1 (S1) данные С-диапазона IW (interferometric wide

swath) моды с поляризациями (VV + VH) и пространственным разрешением 20 м. Работа с изображениями S1 осуществлялась с помощью программы S1Toolbox и позднее SNAP (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1). Для исследуемой территории угол обзора составлял 35° . Предварительная обработка данных включала в себя выделение фрагмента с исследуемой областью и радиометрическую калибровку. Коэффициент обратного рассеяния (КОР) определялся по среднему значению на профиле (3–8 точек) на исследуемом участке.

На рис. 2 приведены графики наземных измерений влажности почвы на глубине 8 см и температуры воздуха, а также радарных измерений на исследуемом участке для 2018 и 2019 гг. (количество сеансов радарной съемки для каждого года N = 30). Данные по наземным измерениям приведены на дату и время пролета спутника Sentinel 1В над исследуемым участком (UTC 17.00). Основная шкала графиков показывает значения объемной влажности почвы в м³/м³ × 100, температуру воздуха в °С, значения КОР в дБ, значения осадков в мм.

Gevenich. Станция сети ISMN TERENO Gevenich имеет координаты 50.9892° с.ш., 6.32355° в.д. (отмечена красной стрелкой на рис. 3). Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение: $0.43 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3})$, глина – 22%, песок – 41%, ил – 37%, organic car-



Рис. 2. Графики наземных и радарных измерений для Falkenberg в 2018 и 2019 гг.



Рис. 3. Место расположения станции Gevenich (слева) и графики наземных и радарных измерений (справа).

bon — 0.74%, пахотные земли, богарные. В наземные измерения входят температура воздуха, осадки, влажность и температура почвы на глубине 5, 20, 50 см. Графики радарных данных (угол съемки 39°) и наземных измерений влажности почвы на глубине 5 см и температуры воздуха на время пролета спутника над исследуемой территорией (6 AM UTC) приведены на рис. 3 (справа).

В табл. 1 приведены значения коэффициента корреляции Спирмена (ККС) ρ_s между КОР Sentinel-1 (*p*-уровень значимости коэффициента корреляции) и наземными измерениями температуры воздуха (*Ta*), влажности почвы (sm) на глубине 5, 8, 15 и 20 см и температуры почвы (*Ts*) на глубине 5 см для двух рассматриваемых наземных станций. Значения ККС определялись с помощью программы Attestat, находящейся в свободном доступе.

Корреляция не является стабильной, и в разные годы для одного и того же профиля принимает разные значения. Так, для станции Falkenberg для 2018 г. отмечаем слабую корреляцию КОР с влажностью почвы и отсутствие корреляции с температурой воздуха и почвы. Для 2019 г. есть умеренная корреляция с влажностью почвы и температурой почвы для VV поляризации и слабая с температурой воздуха. Для Gevenich умеренная корреляция КОР кросс-поляризации с влажностью почвы и температурой воздуха и отсутствие корреляции КОР согласованной поляризации с влажностью почвы. Отметим, что в работе (Родионова, 2018) определялась корреляция между радарными данными и наземными измерениями температуры и влажности почвы для станции Gevenich за период 16.11.14-13.8.16.

	Falkenberg						
	sm_0.08 м	sm_0.15 м	<i>Ts_0</i> .05 м	Ta			
		2018 г.					
VV	$\rho_{\rm s} = 0.32; p = 0.04$	$\rho_{\rm s} = 0.33; p = 0.04$	$\rho_{\rm s} = 0.16; p = 0.2$	$\rho_{\rm s} = 0.11; p = 0.28$			
VH	$\rho_{\rm s} = 0.27; p = 0.07$	$\rho_{\rm s} = 0.34; p = 0.03$	$\rho_{\rm s} = 0.12; p = 0.26$	$\rho_{\rm s} = 0.17; p = 0.19$			
	2019 г.						
VV	$\rho_{\rm s} = 0.69; p = 1 \times 10^{-5}$	$\rho_{\rm s} = 0.72; p = 4 \times 10^{-6}$	$\rho_{\rm s} = -0.61; p = 2 \times 10^{-4}$	$\rho_{\rm s} = -0.38; p = 0.017$			
VH	$\rho_{\rm s} = 0.37; p = 0.02$	$\rho_{\rm s} = 0.42; p = 0.01$	$\rho_{\rm s} = -0.32; p = 0.04$	$\rho_{\rm s} = -0.29; p = 0.056$			
	Gevenich, 2019 r.						
	sm_0.05 м	sm_0.2 м	<i>Ts_0</i> .05 м	Та			
VV	$\rho_{\rm s} = 0.02; p = 0.5$	$\rho_{\rm s} = -0.21; p = 0,.3$	$\rho_{\rm s} = 0.26; p = 0.08$	$\rho_s = 0.37; p = 2 \times 10^{3}$			
VH	$\rho_{\rm s} = -0.51; p = 2 \times 10^{-3}$	$\rho_{\rm s} = -0.65; p = 5 \times 10^{-5}$	$\rho_{\rm s} = 0.71; p = 5 \times 10^{-6}$	$\rho_s = 0.53; p = 1 \times 10^{-3}$			

Таблица 1. Коэффициент корреляции Спирмена (ККС) между радарными данными (N = 30) и наземными измерениями температуры воздуха и почвы и влажности почвы для 2018 и 2019 гг.

Значительное отличие ККС для Falkenberg и Gevenich в 2019 г. для согласованной поляризации скорее всего объясняется разной текстурой почвы для этих станций, а именно, содержанием глины и песка. Так, для Falkenberg содержание глины составляет 6%, песка – 73%, для Gevenich – глины 22%, песка – 41%. Текстура почвы влияет на КОР из-за изменений в диэлектрических свойствах почвы через влагоемкость текстурных составляющих почвы. Jackson и Schmugge (1989) нашли, что молекулы воды поглощаются частицами почвы и эффективно лишают подвижности (связывают) их диполи, препятствуя связанной воде взаимодействовать с сигналом радара. Песчаные почвы содержат более высокое количество свободной воды (free water), чем глинистая почва (Srivastava et al., 2006). Таким образом, коэффициент корреляции Спирмена между КОР и влажностью почвы выше для песчаных почв (Blumberg et al., 2000).

МНОЖЕСТВЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ

Наличие корреляции между наземными измерениями влажности почвы и значениями КОР позволяет построить регрессионные соотношения, определяющие вклад отдельных независимых переменных ($x_1 = \sigma_{VV}^0$ (дБ) – КОР согласованной поляризации, $x_2 = \sigma_{VH}^0$ (дБ) – КОР кроссполяризации, $x_3 = Ta$ (°С) – температура воздуха, $x_4 = Pr$ (мм) – осадки) в вариации зависимой переменной (sm-soil moisture, м³ м⁻³ × 100). В зависимости от числа независимых переменных *i* ре-

грессия бывает однофакторной (i = 1), двухфакторной (i = 2) и т.д. Для определения наилучшей линии регрессии используют метод наименьших квадратов. Регрессия вычисляется с помощью вкладки Excel "Анализ данных". Для оценки качества уравнения регрессии (близости рассчитанных по регрессии и фактических значений у) используются две величины: коэффициент детерминации R^2 (чем ближе R^2 к 1, тем выше качество регрессионной модели) и Se_y – стандартная ошибка регрессии, показывающая среднее расстояние, на которое наблюдаемое значение отклоняется от линии регрессии. При использовании регрессии в целях прогноза Se_v может быть более полезной, чем R^2 , поскольку дает понимание того, насколько точными будут прогнозы.

Формула для 4-х факторной регрессии:

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + fx_4,$$
 (1)

где y — зависимая переменная; a — константа, определяющая точку пересечения прямой с осью y; $x_1 - x_4$ — независимые переменные.

Значения констант во множественной регрессионной модели (1), а также значения коэффициента детерминации и стандартной ошибки регрессии (СОР) для двух станций Falkenberg, Gevenich приведены в табл. 2. Для станции Falkenberg приведены значения констант, R^2 и Se_y для 2019 г. при числе независимых переменных в регрессии от 1 до 4 и влажности почвы на глубине 8 см, а также для трех- и четырехфакторных регрессий для глубины почвы 15 см. Для станции Gevenich для регрессии с числом независимых переменных равным 3 и влажности почвы на глубине 5 и 20 см.

Для Falkenberg двухфакторная регрессия (i = 2) с использованием КОР обеих поляризаций дала лишь малую прибавку (0.002) к коэффициенту детерминации однофакторной регрессии (i = 1) (использование КОР согласованной поляризации) из-за слабой корреляции КОР кросс-поляризации с наземными измерениями влажности почвы. При этом СОР уменьшилась на единицу. Если для регрессии использовать в качестве независимых переменных не только радарные данные, но и метеоданные, а именно, температуру воздуха и осадки, то коэффициент детерминации повышается, а СОР уменьшается. Так при трехфакторной регрессии (i = 3) добавление к радарным переменным температуры воздуха привело к увеличению R^2 до 0.82 и уменьшению СОР до 3. А использование еще и осадков (i = 4) привело к лальнейшему увеличению R² до 0.91 и уменьшению СОР до 2.15. Следует отметить, что учет осадков в виде суммарного количества за сутки, а не на час пролета, может привести к неоправданным скачкам в значениях влажности почвы при ее оценке по регрессии.

Сравнение трехфакторной регрессии (три переменные – σ_{VV}^0 , σ_{VH}^0 , *Ta*) для двух станций показало преимущество по R^2 для Falkenberg,

Для Falkenberg на рис. 4 показаны графики значений объемной влажности почвы ($M^3/M^3 \times 100$), полученные по наземным данным (sm_8 cm) и по регрессионным соотношениям при разном числе параметров в регрессии от i = 2 (reg_VV_VH), i = 3 (reg_VV_VH_*Ta*), до i = 4 (reg_VV_VH_*Ta_Pr*).

Таблица 2. Значения констант в регрессионной модели

i	а	b	с	d	f	R^2	Se_y
		Falke	nberg, 2	2019 г., s	sm_8 см	[
1	38.3	1.8	_	_	_	0.395	6.5
2	39.74	1.73	0.12	_	_	0.397	5.49
3	33.02	1.22	-0.23	-0.59	_	0.82	3.02
4	37.56	1.39	-0.16	-0.59	-1.67	0.91	2.15
	sm_15 см						
3	33.45	1.19	-0.18	-0.59		0.81	3.2
4	38.45	1.37	-0.1	-0.59	-1.84	0.91	2.17
		Geve	enich, 20	019 г., si	m_5 см		
3	12.08	1.23	-1.1	-0.43	-	0.58	3.85
sm_20 см							
3	11.13	0.32	-0.6	-0.26	_	0.64	2.08

Включение в регрессию метеоданных, помимо радарных, привело к значительному увеличению коэффициента детерминации *R*² от 0.39 (парамет-

ры σ_{VV}^0 и σ_{VH}^0) до $R^2 = 0.91$ (параметры σ_{VV}^0 , σ_{VH}^0 , Ta, Pr). Средние значения и СКО отклонений наземных измерений объемной влажности почвы от полученных по регрессии для i = 2 равны, соответственно, 4.26 и 3.05, для i = 3 - 1.99 и 2.02 и для i = 4 - 1.63 и 1.1.



Рис. 4. Графики влажности почвы на глубине 8 см по наземным данным и по регрессионным соотношениям с числом переменных от 2 до 4 для Falkenberg.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 5 2023

Таблица 3.	Значения	ГТК для	исследуемых	станций
------------	----------	---------	-------------	---------

Станция, год	Falkenberg, 2019	Gevenich, 2019	Калмыкия, 2020	Ряз. область 2019, 2020
ГТК (май-сентябрь)	0.37	0.74	0.226	0.98, 1.09

ПРИМЕРЫ ВОЗМОЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГРЕССИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Для того, чтобы распространить регрессионные соотношения, полученные для одной территории, на другую, необходимо выполнить ряд условий, среди основных — это сходные климатические данные, сходные типы подстилающих поверхностей, близкая по составу почва, и другие.

Одним из важнейших факторов является схожесть климатических условий. Наиболее часто количественным показателем используемым климата является гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) (Селянинов, 1928; Селянинов, 1958). Для климатических условий России Селянинов разработал ГТК, характеризующий период вегетации, т.е. период со среднесуточными температурами воздуха больше 10°С. Определяется ГТК следующим образом: ГТК = $10 \Sigma P / \Sigma T$, где ΣP – сумма осадков за вегетационный период, ΣT – сумма среднесуточных температур за этот же период. На основании значений ГТК выделяются природные зоны от пустыни до тайги. ГТК – переменчивая величина, многолетние тренды которой позволяют судить о перемене природной зональности (Шумова, 2021).

В качестве территорий для апробации полученных регрессионных моделей были выбраны на сайте ISMN станции России сети RUSWET-AGRO Kalmkskaya#1 (K1) и Kalmkskaya#2 (K2) (Калмыкия) и Ryazanskaya#2 (114b) (Рязанская область). Значения ГТК для рассматриваемых станций приведены в табл. 3.

Для станций в Калмыкии значение ГТК ближе к ГТК для станции Falkenberg. Для станции в Рязанской области значение ГТК ближе к ГТК для Gevenich.

Калмыкия. На сайте ISMN информация о наземных измерениях на двух станциях Калмыкии сети RUSWET-AGRO Kalmkskaya#1 (K1) и Kalmkskaya#2 (K2) ограничена периодом с 1987.05.08 до 1998.10.08. Координаты станций, соответственно, 46.4° с.ш., 43.63° в.д. и 46.4° с.ш., 43.65° в.д. Состав почвы на глубине 0–30 см: насыщение 0.45 (м³ м⁻³), глина – 21%, песок – 37%, ил – 42%, растительность – трава. Наземные измерения включают влажность почвы на глубине 0–20 и 0– 100 см. По ГТК станции в Калмыкии близки к станции Falkenberg, но по текстуре почвы – к станции Gevenich. Расположение станций в Калмыкии показано на рис. 5 (указатель – красная стрелка вверху слева). На рис. 5, *б* показаны графики наземных измерений влажности почвы на глубине 20 см для станции K2 с 1993 по 1998 гг. (месяцы апрель—октябрь) (для станции K1 наземные измерения влажности почвы ограничены июлем). Радарные данные для исследуемой территории представлены на рис. 5, *в* значениями KOP аппарата Sentinel-1A для 2020 г. Угол съемки 38° . Температура воздуха на момент пролета спутника над исследуемой территорией была взята в архиве погоды в аэропорту Элисты для 2020 г. на сайте гр5.ru (рис. 5, *в*).

Для станций в Калмыкии измерения влажности почвы проводились для глубины 20 см, поэтому воспользуемся регрессией для глубины почвы 15 см (Falkenberg) и для глубины почвы 20 см (Gevenich). Ранее выяснено, что для станций в Калмыкии значение ГТК близко к значению ГТК Falkerberg, а гранулометрический состав почвы близок к соответствующему параметру для Gevenich. Подставим в трехфакторные регрессии для Falkenberg и Gevenich значения КОР и температуры воздуха (σ_{VV}^0 , σ_{VH}^0 , *Ta*) для Калмыкии. На рис. 5, *е* показаны графики "восстановленной" объемной влажности почвы на станции Kalmkskava#2 для 2020 г. на глубине 15 см по регрессии Falkenberg (sm_15_Falk) и на глубине 20 см по регрессии для Gevenich (sm 20 reg Gev). Возможности сравнить полученные оценки влажности почвы для станции Kalmkskaya#2 для 2020 г. с реальными значениями нет. Сравнивая графики на рис. 5, б с графиками на рис. 5, г, можно отметить два момента: сезонный ход наземных измерений влажности почвы (апрель-октябрь) не противоречит полученному по регрессии для Falkenberg (близость климатических параметров); значения влажности почвы, "восстановленной" по регрессии, занижены относительно значений, полученных по наземным измерениям.

Рязанская область. Рассмотрим еще один пример использования регрессии для другой территории. Это станция ISMN Ryazanskaya#2 (114b) сети RUSWET-AGRO, координаты станции 54.24° с.ш., 40.25° в.д. В наличии данные о влажности почвы на глубинах 0–20 см и 0–100 см до 8.11.1998 г. Текстура почвы: глубина 0.00-0.30 м – насыщение 0.42 (м³/м³), глина – 8%, песок – 80%, ил – 12%, organic carbon – 0.58%. Сельхозугодья, неорошаемые.

Выбор данной станции обусловлен тем, что здесь схожая текстура почвы со станцией Falkenberg, но значение ГТК (2019 год, май–сентябрь) в 3 раза больше, чем для Falkenberg.



Рис. 5. Место расположения станций Kalmkskaya#1 и Kalmkskaya#2 (*a*), наземные измерения объемной влажности почвы на глубине 20 см на станции K2 за период 1993–1998 гг. (*б*), значения КОР и температуры воздуха для станции K2 в 2020 г. (*в*), графики значений влажности почвы (глубина 15 и 20 см) на станции K2 в 2020 г. по регрессионным соотношениям (*г*).

Станция Ryazanskaya#2 находится на расстоянии порядка 50 км к югу от Рязани (рис. 6, *a*, указатель — красная стрелка). Данные по температуре воздуха взяты на сайте гр5.ru для станции WMO_ID 27734 Старожилово.

Графики наземных измерений объемной влажности почвы на глубине 20 см на станции Ryazanskaya#2 для 1994–1998 гг. (апрель–октябрь) показаны на рис. 6, б. Результаты радарной съемки спутником S1A исследуемой территории (угол обзора 39°), а также температуры воздуха по измерениям на станции Старожилово на день и время пролета спутника показаны на рис. 6, *в* для 2019 г. Коэффициент корреляции Спирмена между радарными данными и температурой воздуха для 2019 года для согласованной поляризации равен $\rho_s = 0.59 (p = 3 \times 10^{-4})$ и для кросс-поляризации $\rho_s = 0.58 (p = 4 \times 10^{-4}), N = 29.$

Для станции Ryazanskaya#2 измерения влажности почвы проводились для глубины 20 см, поэтому для оценки значений влажности почвы для данной станции в 2019 г. воспользуемся трехфакторной регрессией для Falkenberg, 2019, для глубины почвы 15 см (sm_15_Falk) и трехфакторной регрессией для Gevenich, 2019, для глубины почвы 20 см (sm_20_Gev). В формулы для регрессий подставим радарные данные для Ryazanskaya#2 и температуру воздуха для 2019 г. Полученные графики представлены на рис. 6, *г*.

Проверки полученных по регрессии графиков влажности почвы с реальными значениями нет, но сравнение с рис. 6, *б* (апрель—октябрь) показывает непротиворечивость полученных значений по регрессии с имеющимися архивными значениями. Возможность проверки ограничена дефицитом имеющихся в свободном доступе наземных измерений влажности почвы для территории России настоящего времени.

В данной работе критерием возможного распространения регрессии, полученной для одной



Рис. 6. Место расположения станции Ryazanskaya#2 (указано красной стрелкой внизу) (*a*), наземные измерения влажности почвы на глубине 20 см в 1994–1998 гг. (*б*), графики КОР и температуры воздуха для 2019 года (*в*), графики значений влажности почвы (глубина 15 и 20 см) по регрессионным соотношениям.

территории, на другую территорию, было выполнение двух условий: близости значений ГТК и схожести текстуры почвы. В одном случае — это близость ГТК (Калмыкия), и во втором — схожесть текстуры (Рязанская область). Доступность наземных измерений влажности почвы поможет выявить приоритетные условия для применения регрессионных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки влажности почвы в работе построены регрессионные модели на основе корреляции радарных данных с наземными измерениями влажности почвы. В качестве наземных измерений взяты данные за 2018–2019 гг. для двух станций в Германии (Falkenberg и Gevenich), входящих во всемирную сеть по влажности почвы ISMN. В качестве радарных используются данные спутника Sentinel-1. Построены множественные линейные регрессии с коэффициентом детерминации до 0.91. Предложено использовать в регрессиях не только радарные, но и метеоданные (температуру воздуха и осадки), что позволило увеличить коэффициент детерминации с $R^2 \sim 0.39$ (только радарные измерения) до $R^2 \sim 0.91$ (радарные плюс метеоданные) и уменышить стандартную ошибку регрессии с 5.4 до 2.1. Следует отметить, что использование осадков в качестве независимой переменной может привести к неоправданным скачкам в значениях влажности почвы при ее оценке по регрессии, при условии, что учет осадков осуществляется в виде суммарного количества за сутки, а не на час пролета. Для возможного распространения регрессий, полученных для одной территории, для оценки влажности почвы на другой территории, предложено использовать два критерия: близость значений ГТК (гидротермального коэффициента Селянинова) и схожесть текстуры почвы. По этим критериям выбраны станции в Рязанской области и в Калмыкии, архивные данные которых по влажности почвы содержатся в базе ISMN до 1998 г. Однако, каждая из выбранных станций удовлетворяет только одному из выбранных критериев. Доступность наземных измерений влажности почвы в России является решающим моментом для проверки приведенных в данной работе регрессионных моделей. К сожалению, наземные измерения влажности почвы в России чаше всего доступны только на коммерческой основе.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по теме "Космос".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Родионова Н.В. Корреляция радарных данных Sentinel-1 с наземными измерениями температуры и влажности почвы // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 32–42. https://doi.org/10.31857/S020596140002354-0

Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.

Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР // Вопросы агроклиматического районирования СССР. М.: МСХ СССР. 1958. С. 7–14. Шумова Н.А. Количественные показатели климата в приложении к оценке гидротермических условий в Республике Калмыкия // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27. № 4(89). С. 13–24.

https://doi.org/10.24412/1993-3916-2021-4-13-24

Beale J., Snapir B., Waine T., Evans J., Corstanje R. The significance of soil properties to the estimation of soil moisture from C-band synthetic aperture radar // https://doi.org/. Preprint. Discussion started: 28 June 2019. Author(s) 2019. CC BY 4.0 License.

https://doi.org/10.5194/hess-2019-294

Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokonenko A.D. Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer // Rem. Sens. Environm. 2000. V. 71. P. 309–319.

Chen K., Wu T.-D., Tsang L., Li Q., Shi J., Fung A. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. 41. P. 90–101.

Dubois P., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. 33. P. 915–926.

http://ieeexplore.ieee.org/document/406677/ https://doi.org/10.1109/36.406677

Jackson T.J., Schmugge T.J. Passive microwave remote-sensing system for soil moisture. Some supporting research // IEEE Trans. GRS. 1989. V. 27. P. 225–235.

Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992. 30. P. 370–381.

https://doi.org/10.1109/36.134086

Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R. How far SAR has fulfilled its expectation for soil moisture

Retrieval // SPIE Digital Library. 2006. 6410. Nov. 13–17. Paper No. 64100. P. 1–12.

Wu T.-D., Chen K., Shi J., Fung A. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. 39. P. 2040–2050.

Soil Moisture Estimation by Radar Data Based on Multiple Regression

N. V. Rodionova

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

The task of soil moisture assessing by remote (satellite) methods remains relevant up to the present time. Regression models based on the correlation of radar data with ground measurements of soil moisture are constructed to assess soil moisture in the work. Ground-based measurements were taken at two stations in Germany (Falkenberg and Gevenich), which are part of the ISMN (International Soil Moisture Network) worldwide soil moisture data network. Sentinel-1 satellite data is used as radar data. Multiple regressions with a determination coefficient up to 0.91 are constructed. It is proposed to use not only radar, but also meteorological data in regressions, which allows increasing the coefficient of determination and reducing the standard error of regression. For the possible spread of regressions obtained for one territory to another territory, two criteria are selected: the proximity of the values of the Selyaninov hydrothermal coefficient and the similarity of the soil texture. According to these conditions, two stations in the Ryazan region and in Kalmykia were chosen, whose archival information on soil moisture is contained in the ISMN database up to 1998. Each of the selected stations satisfies only one of the criteria.

Keywords: ground and satellite measurements, volume soil moisture, Spearman correlation coefficient, multiple regression, SCC, soil texture

REFERENCES

Beale J., Snapir B., Waine T., Evans J., Corstanje R. The significance of soil properties to the estimation of soil moisture from C-band synthetic aperture radar // https://doi.org/10.5194/hess-2019-294. Preprint. Discussion started: 28 June 2019. Author(s) 2019. CC BY 4.0 License.

Blumberg D.G., Freilikher V., Lyalko I.V., Vulfson L.D., Kotlyar A.L., Shevchenko V.N., Ryabokonenko A.D. Soil moisture (water-content) assessment by an airborne scatterometer // Rem. Sens. Environm. 2000. V. 71. P. 309–319.

Chen K., Wu T.-D., Tsang L., Li Q., Shi J., Fung A. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. 41. P. 90–101.

Dubois P., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. 33. P. 915–926.

https://doi.org/10.1109/36.406677

http://ieeexplore.ieee.org/document/406677/.

Jackson T.J., Schmugge T.J. Passive microwave remotesensing system for soil moisture. Some supporting research // IEEE Trans. GRS. 1989. V. 27. P. 225–235.

Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992. 30. P. 370–381.

https://doi.org/10.1109/36.134086

Rodionova N.V. Korrelyaciya radarnyh dannyh Sentinel 1 s nazemnymi izmereniyami temperatury i vlazhnosti pochvy [Sentinel 1 data correlation with ground measurements of soil moisture and temperature] // Issledovanie Zemli iz kosmosa". 2018. \mathbb{N} 4. P. 32–42. (In Russian). https://doi.org/10.31857/S020596140002354-0.

10.5185//3020596140002554-0.

Selyaninov G.T. O sel'skohozyajstvennoj ocenke klimata [On agricultural climate assessment] // Trudy po sel'skohozyajstvennoj meteorologii. 1928. Vyp. 20. P. 165–177. (In Russian).

Selyaninov G.T. Principy agroklimaticheskogo rajonirovaniya SSSR [Principles of agro-climatic zoning of the USSR] // Voprosy agroklimaticheskogo rajonirovaniya SSSR. M.: MSKH SSSR. 1958. P. 7–14. (In Russian).

Shumova N.A. Kolichestvennye pokazateli klimata v prilozhenii k ocenke gidrotermicheskih uslovij v Respublike Kalmykiya [Quantitative climate indicators in the assessment of hydrothermal conditions in the Republic of Kalmy-kia] // Aridnye ekosistemy. 2021. V. 27. № 4(89). P. 13–24. (In Russian).

https://doi.org/10.24412/1993-3916-2021-4-13-24

Srivastava H.S., Patel P., Navalgund R.R. How far SAR has fullfilled its expectation for soil moisture

Retrieval // SPIE Digital Library. 2006. 6410. Nov.13–17. Paper No. 64100. P. 1–12.

Wu T.-D., Chen K., Shi J., Fung A. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. 39. P. 2040–2050.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МТВЗА-ГЯ

© 2023 г. Д. С. Сазонов*

Институт космических исследований (ИКИ РАН), Москва, Россия *E-mail: sazonov_33m7@mail.ru Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

В настоящей работе представлен алгоритм восстановления интенсивности осадков над поверхностью океана по данным отечественного микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ. Основой разработанного алгоритма является регрессионная модель ALG'85, в которой для оценки интенсивности осадков используется индекс рассеяния на высокочастотном радиометрическом канале порядка 90 ГГц. В работе проведено моделирования индекса рассеяния на основе данных МТВЗА-ГЯ и его сравнение с данными реанализа GPM IMERG. Для восстановления интенсивности осадков предложено использовать полином четвертой степени. Полученные количественные оценки показывают, что разброс СКО достигает 50%, а коэффициент корреляции не превышает 0.75. Качественное сравнение указывает на существенную разницу между восстановленными осадками и данными GPM IMERG и на наличие смещения области осадков. В результате анализа был сделан вывод, что одной из причин может быть некорректное сведение лучей диаграмм направленности для различных частотных каналов прибора МТВЗА-ГЯ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиояркостная температура, интенсивность осадков, микроволновое излучение, моделирование, регрессионное соотношение

DOI: 10.31857/S020596142305007X, EDN: XQPADE

ВВЕДЕНИЕ

Осадки в виде дождя и снега – одна из главных составляющих глобальной циркуляции воды и энергии, помогающая регулировать климат. Прикладных задач, для которых необходимо знание количества осадков и их распределение в пространстве достаточно много, например: управление водными ресурсами, прогнозирование урожая, наводнений, стихийных бедствий и др. Распределение приборов, способных детектировать и измерять осадки крайне неравномерно по планете. Большая часть таких приборов сосредоточена на суше и коррелированна с плотностью населения, а в океане их практически нет. Таким образом, для измерения осадков в малонаселенных частях суши и над акваторией мирового океана логичным является использование приборов космического базирования.

Спутниковые оценки количества осадков могут быть получены на основе измерений различных приборов. Методы в основном разделены на три главные категории, основанные на типе наблюдений, а именно: методы обработки данных, полученных в видимом, инфракрасном диапазонах; в микроволновом диапазоне излучения; а также методы, основанные на их комбинировании. В настоящей работе будут рассмотрены только микроволновые методы, а именно радиометрические наблюдения. Радиометрические сканеры/зондировщики, установленные на спутниках, приобрели наибольшую популярность при измерении интенсивности осадков в глобальном масштабе. Их основное преимущество перед локаторами заключается в малом энергопотреблении, что позволяет проводить измерения в течение многих лет. Как пример, наиболее известный прибор TMI (TRMM Microwave Imager) проработал 15 лет.

В настоящее время существует много радиометрических приборов, используемых для оценки интенсивности осадков. Это ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), MWRI-1 (Micro-Wave Radiation Imager-1), SSMIS (Special Sensor Microwave – Imager/Sounder), AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiomete) и система GMI-Core (Global Precipitation Measurement Microwave Imager) в которой собираются все доступные радиометрические наблюдения (Kummerow et al., 2015; Zabolotskikh, Chapron, 2015; Zhang et al., 2018; Surussavadee, Staelin, 2010). Среди отечественных, есть серия приборов МТВЗА (Модуль Температурного и Влажностного Зондирования Атмосферы) которые запускались на КА "Метеор-М" № 1 (2009 г.), "Метеор-М" № 2 (2014 г.) и "Метеор-М" № 2-2 (2019 г). В докладе (Бухаров и др., 2010) было упомянуто наличие у их авторов некоторых методик оценки интенсивности осад-ков над водной поверхностью. Однако, отсутствие в открытом доступе каких-либо публикаций по этому вопросу не позволяет судить о возможности их применения к длинным рядам данных МТВЗА-ГЯ (разных серий в том числе) и оценки численных показателей их качества, как, например, в (Ferraro and Marks, 1995). Таким образом, необходимо продолжать исследования и разработку методов восстановления интенсивности осадков по данным МТВЗА-ГЯ, что и является основной целью настоящей работы.

В микроволновой части спектра излучение поверхностью Земли изменяется наличием частиц, размером с дождевые капли. Для определения осадков используется два физических процесса: (1) излучение гидрометеоров, которое приводит к увеличению микроволнового излучения, и (2) рассеяние, что приводит к уменьшению интенсивности излучения. Величина этих эффектов зависит от размера и количества частиц, частоты принимаемого излучения (Kidd et al., 2010). Алгоритмы определения осадков, применительно к пассивным микроволновым наблюдениям, могут быть разделены на основе использования микроволновых каналов или методологически. Выделяют три класса алгоритмов: (1) класс "излучение" – этот тип алгоритмов использует "низкочастотные" каналы для определения увеличения излучения по сравнению с "холодным" излучение поверхности океана (Chang et al., 1999), (2) класс "рассеяние" - этот тип алгоритмов связывает осадки с уменьшением излучения, вызванным рассеянием на частицах (Ferraro and Marks, 1995), и (3) это тип "многоканальной инверсии" – комбинирование первых двух классов (Kummerow et al., 2001). По методологической классификации, алгоритмы могут быть отнесены к одной из двух групп: эмпирические методы – разрабатываются на основе экспериментальных данных и физические методы, которые стараются минимизировать разницу между модельными и экспериментальными данными.

В настоящей работе предложено начать с адаптации простой регрессионной модели восстановления интенсивности осадков над поверхностью океана, модель ALG'85 (Ferraro, 1997) используя только данные прибора МТВЗА-ГЯ. Это позволит исследовать возможность восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ и определить ряд проблем/задач, которые требуют дополнительных исследований.

МОДУЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ (МТВЗА-ГЯ)

Приборы серии МТВЗА похожи на свои зарубежные аналоги. Основным отличием серии МТВЗА является необычный, для приборов с коническим сканированием, угол визировании (53.3°) и соответственно угол падения в 65°. Для большинства зарубежных аналогов угол падения составляет порядка 53°. Такое отличие приводит к необходимости разрабатывать новые (или переделывать уже имеющиеся) алгоритмы обработки данных, для того что бы конечный пользователь мог получить качественную информацию из нового независимого источника. (Ермаков и др., 2021).

Радиометрические каналы сканера МТВЗА-ГЯ включают рабочие частоты в окнах прозрачности атмосферы 10.6, 18.7, 23.8, 31.5, 36.7, 42, 48 и 91.65 ГГц, а зондировщика — в линиях поглощения кислорода 52—58 ГГц и водяного пара 183 ГГц. Подробное описание можно найти в работах (Болдырев и др., 2008; Чернявский и др., 2018).

Спутниковые данные МТВЗА-ГЯ поступают в ЦКП (Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений ИКИ РАН) "ИКИ-Мониторинг" в виде сформированных потоков данных и сопутствующей информации звездных датчиков (Ермаков и др., 2021). Результаты сохраняются в архивах ЦКП "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2019; http://ckp.geosmis.ru/), что обеспечивает автоматическое формирование наборов данных для дальнейшей обработки и отображения в картографическом веб-интерфейсе системы Bera-Science (http://sci-vega.ru/).

ТЕХНИКА ВЫДЕЛЕНИЯ СВОБОДНОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Восстановление интенсивности осадков над поверхностью воды подразумевает наблюдение сцен свободной водной поверхности (без суши и льда). Для выделения суши была взята топографическая карта с шагом 60 угловых секунд. (NOAA National Centers for Environmental Information. 2022: ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model. NOAA National Centers for Environmental Information. https://doi.org/10.25921/fd45-gt74. Accessed [15.01.2022]). По указанной топографической карте была создана маска для картирования данных МТВЗА-ГЯ по типам: суша, берег и вода. Так как пространственное разрешение самого низкочастотного канала МТВЗА-ГЯ (10.6 ГГц) составляет порядка 100 км по одной из осей, то отступ от берега был увеличен на 1 градус в сторону воды для того чтобы все анализируемые измерения находились над поверхностью воды.

Картирование ледовой области представляет определенные трудности, связанные с пространственным и временным изменением площади ледового покрытия в океане. Одним из важных источником информации для оперативных задач мониторинга ледяного покрова являются поля сплоченности льда (англ. sea ice concentration — SIC). Одно из недавних исследований по восстановлению SIC по данным МТВЗА-ГЯ представлено в работе Заболотских и др., 2022. Часть предложенного алгоритма использована для текущей задачи картирования ледовой области.

Традиционно, для восстановления SIC используют данные полученные на частотах вблизи 90 ГГц, благодаря чему достигается максимально возможное на сегодняшний день разрешение при использовании радиометрии. Однако, у прибора МТВЗА-ГЯ не работает канал с горизонтальной поляризацией на частоте 91.65 ГГц, поэтому использовать общепринятые алгоритмы картирования ледовой области не представляется возможным. В работе (Заболотских и др., 2022) предложен алгоритм, по которому возможно определить концентрацию ледяного покрова используя частоты 10.6 и 36.7 ГГц. В текущем исследовании нет необходимости определять концентрацию льда, а достаточно определить наличие льда на поверхности, поэтому будет использована только поляризационная разница (*PD* – разница между вертикально и горизонтально поляризованным излучением на одной частоте) на частоте в 10.6 ГГц. Использование указанной частоты ухудшает пространственное разрешение, однако, по оценкам (Заболотских и др., 2022) позволяет восстанавливать SIC с меньшими погрешностями, а, следовательно, и лучше будет проводиться картирование ледовой области. Указано, что при PD < 120 К (10.6 ГГц) начинает появляться лед, поэтому значение в 120 К выбрано как пороговое.

Известно, что максимальная площадь ледового покрова Арктики обычно наблюдается в марте, а Антарктики в конце сентября. Для этих периодов были проанализированы данные полученные из системы Remote Sensing Systems DMSP SSM/I ог SSMIS (Wentz et al., 2012). По полученные картам была построена маска максимальной площади ледового покрытия регионов Арктики и Антарктики. К построенной маске максимальной площади ледового покрытия добавлен запас в 2 градуса по широте. Если наблюдения попадают в область, где возможен лед, то проходят проверку поляризационной разницы, если PD < 120 K, то данное измерение маркируется как лед и не используется при анализе осадков.

ИНДЕКС РАССЕЯНИЯ. ПОДБОР УРАВНЕНИЯ

Для определения интенсивности осадков используется два четких процесса: (1) излучение дождевых капель, которое приводит к увеличению микроволнового излучения на частотах ниже 40 ГГц, и (2) рассеяние, вызванное осадками, что приводит к уменьшению интенсивности прохоляшего через осалки излучения на частотах выше 80 ГГц. Значения указанных пороговых частот радиотеплового излучения условное, и связно с работой радиометрических систем, используемых для мониторинга поверхности, в окнах прозрачности атмосферы. Величина эффектов излучения и рассеяния на дождевых каплях зависит от размера и количества частиц. Однако возможности измерения осадков определяются также и свойствами подстилающей поверхности. В работе (Grody, 1991) проведено обширное исследование классификации снежного покрова и осадков на основе измерений прибора SSMI (Special Sensor Microwave Imager), и показано, что над водной поверхностью классифицировать осадки проще, чем над поверхностью суши. Это связано с неоднородностью излучающей способности суши по сравнению с практически однородной излучающей способностью морской воды.

В работе (Grody, 1991) используется Индекс Рассеяния (англ. Scattering Index) *SI* как положительная разница между измерениями на частотах 22 и 85 ГГц. Данный индекс характеризует наличие веществ в атмосфере и на поверхности, которые рассеивают восходящее радиотепловое излучение. Так же было отмечено, что для более точной идентификации рассеяния необходимо привлекать измерения на других частотных каналах и что оценки должны быть выполнены на большом наборе данных, включающем в себя различные состояния поверхности и атмосферы.

Применительно к радиометрическим каналам прибора МТВЗА-ГЯ индекс рассеяния для частоты 91.65 ГГц вертикальной поляризации (V), далее просто *SI*, может быть записан как

$$SI = F - T_{91.65}^{\nu}, \tag{1}$$

где F — это функция, выраженная в виде суммы с весовыми коэффициентами радиояркостных температур на частотах отличных от 91.65 ГГц, и характеризующая каким могло бы быть излучение на частоте 91.65 ГГц в отсутствии рассеяния. $T_{91.65}^V$ — радиояркостная температура на частоте 91.65 ГГц вертикальная поляризация.

У прибора МТВЗА-ГЯ всего доступно 24 радиометрических канала. Однако, на некоторых канала есть сбои и высокий уровень шумов, они не используются (это каналы $T_{91.6}^{H}, T_{42}^{V,H}, T_{48}^{V,H}$). Так же не используются каналы в линии погло-

Таблица 1. Коэффициенты *а*, регрессии (3)

Коэффициент	a_0	a_1	<i>a</i> ₂	a_3	a_4
Значение	422.055	-14,293	0,031	-7.302	0.022
Коэффициент	a_5	a_6	a_7	a_8	
Значение	17.114	-0.037	0.421	-0.0035	

щения кислорода. Поэтому для анализа индекса рассеяния *SI* будет использовано всего 11 каналов данных. Это каналы $T_{10.6}^{V,H}$, $T_{18.7}^{V,H}$, $T_{23.8}^{V,H}$, $T_{31.5}^{V,H}$, $T_{36.7}^{V,H}$ и $T_{91.65}^{V}$. Для разработки соотношения для функции *F* используются все данные за 2020 г., усредненные за каждый месяц. Усреднение было сделано для уменьшения объема точек и многократного сокращения вычислительных ресурсов. Усреднение проводилось для всех измерений над открытой поверхностью океана свободной ото льда в диапазоне $\pm 0.5^{\circ}$ по широте для всех значений долгот. Таким образом, за каждый месяц получены средние значения радиояркосных температур для каждого радиометрического канала MTB3A-ГЯ в зависимости от широты.

Для составления регрессионного соотношения функции *F* изначально были использованы все радиометрические каналы данных в "окнах прозрачности" атмосферы.

$$F = a_0 + \sum_{i=1}^{11} a_i T_i + \sum_{i=11}^{20} a_i (T_i)^2, \qquad (2)$$

где: a_i — коэффициенты регрессии. Под радиометрическим каналом T_i понимается измерение на одной частоте и на одной поляризации. Коэффициенты регрессии вычисляются методом наименьших квадратов по методике, указанной в статье (Сазонов и др., 2020). Общий коэффициент корреляции между радиояркостной температурой $T_{91.65}^V$ и функцией *F* составил 0.9961, а СКО не более 2 К.

Соотношение (2) адекватно связывает радио-

яркостную температуру $T_{91.65}^{\nu}$ с ее расчетом на основе других радиометрических каналов прибора МТВЗА-ГЯ, однако, избыточно и может быть упрощено с помощью проверки коэффициентов регрессии по уровню значимости. Это позволит убрать из уравнения (2) факторы, влияние которых незначительно, либо полностью отсутствует, что упростит вид регрессионного соотношения.

Методика проверки коэффициентов линейной регрессии на статистическую значимость приведена в приложении статьи (Сазонов и др., 2020). Для коэффициентов регрессии (2) были рассчитаны значения *t*-критерия (t_a). Из таблицы критических точек распределения Стьюдента выбирается пороговое значение t(k, a = 0.01) = 2.58 (a - уровень значимости, k - число степеней свободы, при большом количестве экспериментальных данных, k принимается равным бесконечно $сти). Таким образом, если <math>t_a < 2.58$ для какого либо коэффициента a_i , то этот коэффициент статистически незначим и может быть убраны из уравнения регрессии без потери качества модели. Результирующее уравнение будет иметь следующий вид:

$$F = a_0 + a_1 T_{10.6}^V + a_2 \left(T_{10.6}^V\right)^2 + a_3 T_{23.8}^V + a_4 \left(T_{23.8}^V\right)^2 + a_5 T_{31.5}^V + a_6 \left(T_{31.5}^V\right)^2 + a_7 T_{23.8}^H + a_8 \left(T_{23.8}^H\right)^2,$$
(3)

где коэффициенты $a_0 - a_8$ приведены в табл. 1.

На рис. 1 приведена диаграмма рассеяния усредненных за месяц радиояркостных температур на канале $T_{91.65}^{V}$ и их модельных по регрессии (3) значений. Корреляция составляет 0.9932. На рис. 2 приведены расчетные значения СКО, накопленные в диапазоне ± 0.5 К. СКО, в среднем, составляет порядка 1.5 К. Большой значение СКО в области с температурами менее 235 К связан с малым количеством анализируемых данных в этой области.

На рис. 3 приведены измеренные значения ра-

диояркостной температуры на канале $T_{91.65}^{\nu}$, ее модельный расчет на основе уравнения (3) и их разница на основе уравнения (1) — индекс рассеяния *SI* на частоте 91.65 ГГц. Индекс рассеяния используется для анализа и восстановления интенсивности осадков.

СОВМЕЩЕНИЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА И МТВЗА. ВЫБОР ОБЛАСТЕЙ С ОСАДКАМИ

Для исследования интенсивности осадков необходим большой набор наблюдений разных по интенсивности зон осадков в разных частях Земли. Одним из таких наборов является GPM IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurements) (Huffman et al., 2019). Указанный набор состоит из оценок осадков с различных пассивных микроволновых радиометров входящих в созвездие GPM (https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/constellation). Осадки рассчитываются с использованием алгоритма Goddard



Рис. 1. Диаграмма рассеяния усредненных за месяц

радиояркостных температур на канале $T_{91.65}^{V}$ и их модельных по регрессии (3) значений. Приведены данные за период с февраля по декабрь 2020 г.

Profiling Algorithm версии 2017 г. (GPROF2017) (Randel et al., 2020), затем приводятся к координатной сетке и проходят интеркалибровку по алгоритму Combined Ku Radar-Radiometer Algorithm (CORRA). Итоговый продукт — получасовые поля размером $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (примерно 10×10 км).

Данные МТВЗА-ГЯ состоят из файлов записей восходящих и нисходящих полувитков. По отдельности работать с этими файлами достаточно сложно. Поэтому полученные данные были собраны в один массив за 1 день с разделением на восходящие и нисходящие витки. Совмещение набора GPM IMERG с данными МТВЗА-ГЯ проведено по времени, то есть, для каждого измерения МТВЗА-ГЯ выбирались данные из набора GPM IMERG с разницей по времени не более чем на ±15 мин. Таким образом, получены наборы данных об осадках в координатах широты, долготы и времени, соответствующих прибору МТВЗА-ГЯ. Затем, для удобства обработки и визуализации, полученные массивы всех данных накладываются на регулярную сетку $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (рис. 3, карта интенсивности осадков). Собраны все имеющиеся данные МТВЗА-ГЯ за 2020 г. с 1 февраля по 31 декабря.

Выделение областей с осадками/индексом рассеяния производится в следующей последовательности: (1) На рассчитанные карты с индексом рассеяния *SI* накладывается маска при условии, что SI > 10. (2) Полученная маска преобразуется в контур, и выбираются замкнутые контуры с количеством точек периметра не менее 80 (данное



Рис. 2. Расчетные значения СКО при моделировании

радиояркостной температуры на канале $T_{91.65}^{V}$. СКО рассчитано для радиояркостных температур попавших в диапазон $\Delta_T = 1$ К.

значение получено опытным путем, и позволяет выделить средние и большие области с увеличенным рассеянием). (3) Определяются границы областей и к ним добавляется запас величиной в 1°. Полученные прямоугольные области используются для анализа связи индекса рассеянии и интенсивности осадков. За 2020 г. накоплено 3448 областей для восходящих витков и 4166 областей для нисходящих витков.

ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАДКОВ ОТ ИНДЕКСА РАССЕЯНИЯ

На рис. 4 представлена анализируемая область с осадками, полученная по данным GPM IMERG, область с рассеянием, полученным по уравнению (1). Временное расхождение при совмещении данных составляет -1 мин, т.е. измерения, выполненные прибором МТВЗА-ГЯ проведены на 1 мин раньше, чем оценки интенсивности осадков по данным GPM IMERG. Как видно из представленных карт есть разница в расположении области рассеяния и области осадков. Это может быть связно с неточностью геопривязки наблюдений МТВЗА-ГЯ, о которой изложено в работе (Sadovsky, Sazonov, 2022). Также возможны ошибки сведения лучей диаграммы направленности МТВЗА-ГЯ для разных радиометрических каналов (этот вопрос еще не исследован).

САЗОНОВ



Рис. 3. Карты измеренной радиояркостной температуры на частоте $T_{91.65}^V$, ее модельный расчет и их разница – индекс рассеяния *SI*, совмещенные данные интенсивности осадков из набора данных GPM IMERG. Данные за 6 июня 2020 г.

Таким образом, нет возможности наложить напрямую карты с рассеянием и осадками друг на друга.

Для получения зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния *SI* по выбранной области все значения, как осадков, так и рассеяния были построены в ряд и отсортированы по убыванию. Полученная зависимость показана рис. 4, и она соответствует результатам аналогичных исследований, показанных, например, в работе (Ferraro, 1997).

На рис. 5 приведены зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния *SI*. Статистика накоплена по всем выделенным областям для восходящих и нисходящих витков. Временное совмещение составляет ± 1 мин. Как видно из рис. 5, результаты для восходящих и нисходящих витков в диапазоне осадков до 25 мм/ч практиче-



Рис. 4. Карта области с рассеянием (слева), карта интенсивности осадков (справа) и график их совмещения (снизу).



Рис. 5. Карты зависимости интенсивности осадков от индекса рассеяния для восходящих и нисходящих витков. Статистика по всем областям, накопленным за 2020 г. в диапазоне временного совмещения ± 1 мин. Шкала указывает количество измерении, попавших в диапазон $\Delta_{SI} = 0.5$ К и $\Delta_I = 0.5$ мм/ч.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 5 2023

30

Коэффициент полинома	Значение коэффициента	Значение коэффициента для 95% доверительного интервала
a	0.1511	(0.1386, 0.1636)
b	0.004848	(0.001024, 0.008672)
С	0.01557	(0.01528, 0.01586)
d	-0.0003138	(-0.0003212, -0.0003064)
е	2.504e-06	(2.447e-06, 2.561e-06)

Таблица 2. Коэффициенты полинома (4)

ски идентичны. В диапазоне осадков более 25 мм/ч (и для SI > 50) данных очень мало и поэтому статистика не достоверна. Таким образом, для построения функциональной связи SI с интенсивностью осадков данные с обоих типов витков объединены.

Функциональную связь между индексом рассеяния и интенсивностью осадков *I* наиболее часто описывают степенным уравнением или полиномом. После исследования степенных, показательных и экспоненциальной функций в качестве аппроксимационных, было принято решение использовать полином 4-ой степени (4), который обладает наилучшим коэффициентом корреляции. Аппроксимация построена в предположении, что погрешности реанализа и ошибки моделирования *SI* отсутствуют. На рис. 6 приведены



Рис. 6. Зависимость интенсивности осадков от индекса рассеяния *SI* и ее аппроксимация функцией (4).

средние значения интенсивности осадков от *SI*, диапазон накопления $\Delta_{SI} = 2$, и СКО, которое обуславливает 68% всех точек.

$$I = a + bSI + cSI^{2} + dSI^{3} + eSI^{4},$$
 (4)

где значения коэффициентов полинома приведены в табл. 3.

На рис. 7 приведено среднеквадратичное отклонение интенсивности осадков от модельных значений функции (4). СКО составляет в среднем 40–50% от восстанавливаемой величины.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 8 приведены три области с восстановленными интенсивностями осадков и соответствующие им значения осадков по данным GPM IMERG. Качественное сравнение указывает на существенную разницу между восстановленными осадками и данными GPM IMERG и на наличие



Рис. 7. Среднеквадратичное отклонение интенсивности осадков от модельных значений функции (4).



Рис 8. Восстановленные области осадков и данные по GPM IMERG, данные за 06.06.2020 г., восходящие витки.



Рис. 9. Индекс рассеяния SI (К) для восходящих и нисходящих витков. Данные за 06.06.2020 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 5 2023

смещения области осадков вниз для восходящих витков и вверх для нисходящих (здесь нисходящие витки не показаны). Указанная разница может быть связна с временным расхождением между наборами данных, которое для показанных областей составляет -1, 7 и 15 мин (соответственно, сверху вниз). Тогда на верхних областях мы должны наблюдать практически одинаковую картину распределения осадков. В принципе, так и есть если отбросить смещение и учесть погрешности из рис. 6 и 7.

Однако, большое значение СКО не может объяснить отмеченного смешения области восстановленной интенсивности осадков. Это можно объяснить, используя карты для индекса рассеяния SI на рис. 9. Над областью с большим рассеянием для восходящих витков есть темные участки, в которых значения нулевые и отрицательны. Для нисходящих витков эти участки находятся под областью осадков. В обоих случаях участки с отрицательными значениями SI повторяют контур области осадков. Исходя из формул (1) и (3), индекс рассеяния не может быть меньше нуля, однако, учитывая СКО для регрессии 3 (рис. 2) отрицательные значения возможны, но не более 5 К (в среднем), а получаемые значения *SI* могут достигать и -20 К, что физически не возможно.

Объяснить отрицательные значения SI можно только тем, что измерения для частоты 91.65 ГГц выполнены в другой точке пространства, нежели измерения для каналов с "низкой" частотой (10.6, 23.8 и 31.5 ГГц). Например, измерения на каналах с "низкой" частотой выполнены в области осадков. По формуле (3) проводится расчет F – модельной оценки излучения на частоте 91.65 ГГц. (Стоит учесть, что "низкочастотные" каналы тоже чувствительные к осадкам, хотя и в значительно меньшей степени, чем на частоте 91.65 ГГц, что можно отметить по 2-ому сверху графику на модельном расчете F (рис. 3)). Если луч диаграммы направленности канала 91.65 ГГц смотрит в туже точку, что и другие, тогда в зоне с осадками на данной частоте должно быть большое рассеяние (низкая радиояркостная температура) и результат по формуле (3) получится положительный. Если же диаграммы направленности канала 91.65 ГГц смотрит в другую, точку пространства, где осадков нет, тогда нет рассеяния на частицах осадков (высокая радиояркостная температура) и результат по формуле (3) получится отрицательный. В обратном случае, когда на канале 91.65 ГГц регистрируются осадки, а на других нет, будет положительное значение индекса рассеяния SI.

Предложенное объяснение, по-видимому, и определяет наблюдаемый сдвиг области рассеяния на рис. 9 и, как следствие, сдвиг области осадков на всех левых областях рис. 8. Таким образом, можно сделать вывод, что луч диаграммы направленности канала 91.65 ГГц захватывает другой участок пространства, нежели лучи для каналов (10.6, 23.8 и 31.5 ГГц). Более того, наблюдаемое смещение областей с осадками носит систематический характер. Все, вышесказанное, позволяет предположить, что лучи диаграмм направленности для различных частотных каналов прибора МТВЗА-ГЯ сведены некорректно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты показывают, что разброс СКО достигает 50%, а коэффициент корреляции не превышает 0.75, по сравнению с результатами работы (Zabolotskikh, Chapron, 2015), где по данным прибора AMSR-2 интенсивность осадков восстанавливается с коэффициентом корреляции 0.8 и СКО = 1 мм/ч. Такие показатели не обеспечивают должную надежность связи радиоизлучения системы "океан—атмосфера" и интенсивности осадков, восстановленных по данным MTB3A-ГЯ.

Конечно, интенсивность осадков, возможно, восстанавливать по радиометрическим измерениям МТВЗА-ГЯ. Однако на данном этапе работ точность неудовлетворительная, по сравнению с другими приборами и алгоритмами. Необходимо провести углубленный анализ параметров работы прибора — его геопривязку по всем каналам, сведение лучей диаграмм направленности, приведение пространственного разрешения к единому масштабу. И только после решения указанных вопросов вернуться к восстановлению интенсивности осадков и других геофизических параметров.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема "Мониторинг", госрегистрация № 122042500031-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А., Никитин О.В., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. № 5. С. 243–248.

Бухаров М.В., Миронова Н.С., Сизенова Е.А. Распознавание метеорологических явлений и оценка их параметров по многоспектральной информации микроволнового радиометра МТВЗА // Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса": Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 140.

Ермаков Д.М., Кузьмин А.В., Мазуров А.А., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Чернушич А.П., Черный И.В., Стрельцов А.М., Шарков Е.А., *Екимов Н.С.* Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП "ИКИ-Мониторинг" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303

Заболотских Е.В., Балашова Е.А., Азаров С.М. Восстановление сплоченности морского льда по данным измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 27–38.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38

Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов 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") // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170

Сазонов Д.С., Садовский И.Н., Кузьмин А.В. Космический эксперимент "Конвергенция". Дистанционное определение температуры океана по радиоизмерениям на частотах 10.65, 18.7 и 36.5 ГГц // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 2. С. 82–94.

Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Чёрный И.В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника "Метеор-М" № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100

Chang A.T.C., Chiu L.S., Kummerow C.D., Meng J., Wilheit T.T. First results of the TRMM Microwave Imager (TMI) monthly oceanic rain rate: Comparison with SSM/I, Geophys. Res. Lett., 1999. 26. P. 2379–2382.

Chinnawat Surussavadee, David H. Staelin NPOESS Precipitation Retrievals Using the ATMS Passive Microwave Spectrometer, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, 2010, V. 7. № 3. P. 440–444. https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2038614

Ferraro R.R., Marks G.F. The development of SSM/I rainrate retrieval algorithms using ground-based radar measurements, J. Atmos. Oceanic Technol. 1995. 12. P. 755–770.

Ferraro R.R. Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D14. P. 16.715–16.735.

Grody N.C. Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), J. Geophys. Res. 1991. 96. P. 7423–7435.

Huffman G.J., Stocker E.F., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Tan Jackson (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [30.04.2022].

https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06

Kidd C., Levizzani V., Laviola S. Quantitative Precipitation Estimation From Earth Observation Satellites, In book Rainfall: State of the Science, American Geophysical Union, 2010. P. 127–158.

https://doi.org/10.10292009GM000920

Kummerow C.D., Hong Y., Olson W.S., Yang S., Adler R.F., McCollum J., Ferraro R.R., Petty G., Shin D.-B., Wilheit T.T. The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, J. Appl. Meteorol. 2001. V. 40. № 8. P. 1801–1820.

Kummerow C.D., Randel D.L., Kulie M., Wang N.Y., Ferraro R., Munchak S.J., Petkovic V. The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm to a Fully Parametric Scheme. JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY, 2015. V. 32. № 12. P. 2265–2280.

https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0039.1

Randel D.L., Kummerow C.D., Ringerud S. The Goddard Profiling (GPROF) Precipitation Retrieval Algorithm. Advances in Global Change Research. 2020. P. 141–152. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_8

Sadovsky I.N., Sazonov D.S. Geographic Reference of MT-VZA-GYa Radiometric Remote-Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2022. V. 58, № 12. P. 1664–1674.

https://doi.org/10.1134/S0001433822120210

Wentz F.J., Hilburn K.A., Smith D.K. Remote Sensing Systems DMSP [SSM/I or SSMIS] [Daily, 3-Day, Weekly, Monthly] Environmental Suite on 0.25 deg grid, Version 7, 2012 Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at www.remss.com/missions/ssmi. [Accessed 15 Jan 2022].

Zabolotskikh E., Chapron B. Validation of the New Algorithm for Rain Rate Retrieval from AMSR2 Data Using TMI Rain Rate Product. Advances in Meteorology Volume 2015. Article ID 492603. 12 p.

https://doi.org/10.1155/2015/492603

Zhang R., Wang Z., Hilburn K.A. Tropical Cyclone Rainfall Estimates from FY-3B MWRI Brightness Temperatures Using the WS Algorithm. Remote Sens. 2018. 10. 1770. https://doi.org/10.3390/rs10111770

Study the Possibility of Precipitation Intensity Recovery from MTVZA-GYa Measurements

D. S. Sazonov

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

In this paper, we present an algorithm for restoring rain rate over the ocean according to the data of the microwave sounder MTVZA-GYa. The basis of the developed algorithm is the ALG'85 regression model, in which the scattering index on the high-frequency radiometric channel (~90 GHz) is used to estimate the intensity of precipitation. In this work, the scattering index was simulated based on the MTVZA-GYa data and

САЗОНОВ

compared with the GPM IMERG reanalysis data. To restore the rain rate, it is proposed to use a polynomial of the fourth degree. The obtained quantitative estimates show that the spread of RMS reaches 50%, and the correlation coefficient does not exceed 0.75. The qualitative comparison indicates a significant difference between the restored rain rate and the GPM IMERG data and the presence of a shift in the precipitation area. As a result of the analysis, it was concluded that one of the reasons may be the incorrect convergence of the beams of the radiation patterns for various frequency channels of the MTVZA-GYa device.

Keywords: remote sensing, brightness temperature, precipitation intensity, microwave radiation, modeling, regression relation

REFERENCES

Boldyrev V.V., Gorobets N.N., Il'gasov P.A., Nikitin O.V., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Strel'tsov A.M., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M., Yakovlev V.V. Satellite microwave scanner/sounder MTVZA-GY, Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2008. V. 1. № 5. P. 243–248. (In Russian).

Bukharov M.V., Mironova N.S., Sizenova E.A. Raspoznavanie meteorologicheskikh yavlenii i otsenka ikh parametrov po mnogospektral'noi informatsii mikrovolnovogo radiometra MTVZA [Recognition of meteorological phenomena and estimation of their parameters from multispectral information of the MTVZA microwave radiometer] // Vos'maya vserossiiskaya otkrytaya ezhegodnaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa": Tez. dokl. M.: IKI RAN, 2010. P. 140. (In Russian).

Chang A.T.C., Chiu L.S., Kummerow C.D., Meng J., Wilheit T.T., First results of the TRMM Microwave Imager (TMI) monthly oceanic rain rate: Comparison with SSM/I, Geophys. Res. Lett., 1999. 26. P. 2379–2382.

Chernyavskii G.M., Mitnik L.M., Kuleshov V.P., Mitnik M.L., Chernyi I.V. Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M № 2 data, Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. № 4. P. 78–100.

Chinnawat Surussavadee, David H. Staelin, NPOESS Precipitation Retrievals Using the ATMS Passive Microwave Spectrometer, IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, 2010. V. 7. № 3. P. 440–444. https://doi.org/10.10.1109/LGRS.2009.2038614

Ermakov D.M., Kuz'min A.V., Mazurov A.A., Pashinov E.V., Sadovskii I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Chernushich A.P., Chernyi I.V., Strel'tsov A.M., Sharkov E.A., Ekimov N.S. The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on the IKI-Monitoring Center for Collective Use, Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. № 4. P. 298–303. (In Russian).

https://doi.org/10.10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303

Ferraro R.R., Marks G.F. The development of SSM/I rainrate retrieval algorithms using ground-based radar measurements, J. Atmos. Oceanic Technol., 1995. 12. P. 755– 770. *Ferraro R.R.* Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № D14. P. 16.715–16.735.

Grody N.C. Classification of snow cover and precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), J. Geophys. Res., 1991. 96. P. 7423–7435.

Huffman G.J., Stocker E.F., Bolvin D.T., Nelkin E.J., Jackson Tan (2019), GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Accessed: [30.04.2022].

https://doi.org/10.10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06

Kidd C., Levizzani V., Laviola S. Quantitative Precipitation Estimation From Earth Observation Satellites, In book Rainfall: State of the Science, American Geophysical Union, 2010. P. 127–158.

https://doi.org/10.10.10292009GM000920

Kummerow C.D., Hong Y., Olson W.S., Yang S., Adler R.F., McCollum J., Ferraro R.R., Petty G., Shin D.-B., Wilheit T.T. The evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors, J. Appl. Meteorol., 2001. V. 40. \mathbb{N} 8. P. 1801–1820.

Kummerow C.D., Randel D.L., Kulie M., Wang N.Y., Ferraro R., Munchak S.J., Petkovic V. The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm to a Fully Parametric Scheme. journal of atmospheric and oceanic technology. 2015. V. 32. № 12. P. 2265–2280.

https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0039.1

Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev 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. Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2019. V. 16. No 3. P. 151–170. (In Russian).

https://doi.org/10.10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170

Randel D.L., Kummerow C.D., Ringerud S. The Goddard Profiling (GPROF) Precipitation Retrieval Algorithm. Advances in Global Change Research. 2020. P. 141–152. https://doi.org/10.10.1007/978-3-030-24568-9_8

Sadovsky I.N., Sazonov D.S. Geographic Reference of MT-VZA-GYa Radiometric Remote-Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. № 12. P. 1664–1674.

https://doi.org/10.10.1134/S0001433822120210

Sazonov D.S., Sadovskii I.N., Kuz'min A.V. Space Experiment "Convergence". Remote Determination of the Ocean Temperature by Radio Measurements at a Frequency of 10.65, 18.7 and 36.5 GHz, Issled. Zemli iz kosmosa. 2020. № 2. P. 82–94. (In Russian).

Wentz F.J., Hilburn K.A., Smith D.K. Remote Sensing Systems DMSP [SSM/I or SSMIS] [Daily, 3-Day, Weekly, Monthly] Environmental Suite on 0.25 deg grid, Version 7, 2012 Remote Sensing Systems, Santa Rosa, CA. Available online at www.remss.com/missions/ssmi. [Accessed 15 Jan 2022].

Zabolotskikh E., Chapron B. Validation of the New Algorithm for Rain Rate Retrieval from AMSR2 Data Using TMI Rain Rate Product. Advances in Meteorology Volume 2015. Article ID 492603. 12 p. http://dx.doi.org/10.1155/2015/492603

Zabolotskikh E.V., Balashova E.A., Azarov S.M. Sea ice concentration retrieval from MTVZA-GYa measurements, Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 1. P. 27–38. (In Russian). https://doi.org/10.10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38

Zhang R., Wang Z., Hilburn K.A. Tropical Cyclone Rainfall Estimates from FY-3B MWRI Brightness Temperatures Using the WS Algorithm. Remote Sens. 2018. 10. 1770. https://doi.org/10.10.3390/rs10111770
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ВЛИЯНИЕ КВАЗИДВУХЛЕТНЕЙ ЦИКЛИЧНОСТИ НА ДИНАМИКУ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОЛЯРНЫХ ВИХРЕЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 г. В. В. Зуев^а, Э. А. Масленникова^{а, b,} *, Е. С. Савельева^а

^аИнститут мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН, Томск, Россия ^bНациональный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия *E-mail: maslennikovaerika@email.com

Поступила в редакцию 16.12.2022 г.

Период существования полярных озоновых аномалий зависит от фазы квазидвухлетней цикличности (КДЦ). КДЦ определяет расположение субтропической критической линии ветра, которое влияет на распространение планетарных волн в стратосферу. В результате, во время западной фазы КДЦ наблюдается усиление полярного вихря, а во время восточной – его ослабление, что проявляется в сроках, продолжительности и интенсивности разрушения стратосферного озона. Полярные озоновые аномалии формируются внутри устойчивого полярного вихря в период с конца зимы по весну в результате протекания гетерогенных и фотохимических реакций разрушения озона в присутствии солнечного излучения. Работа посвящена исследованию влияния фаз КДЦ на разных изобарических уровнях на динамику стратосферных полярных вихрей на основе спутниковых данных Goddard Space Flight Center NASA. Показано, что преобладающее влияние на динамику полярных вихрей оказывает КДЦ на уровне 30 гПа. В динамике антарктического полярного вихря это проявляется с сентября по декабрь, особенно в октябре и ноябре, а в динамике арктического полярного вихря – на протяжении всего периода его существования.

Ключевые слова: квазидвухлетняя цикличность, стратосферные полярные вихри, зональный ветер **DOI:** 10.31857/S0205961423050093, **EDN:** XOGYAA

введение

Механизм влияния квазидвухлетней цикличности (КДЦ) на стратосферные полярные вихри был выявлен американскими учеными Holton J.R. и Tan H.-C. в 1980 г. и получил название механизм Холтона–Тана (the Holton–Tan mechanism) (Holton, Tan, 1980). Они показали, что КДЦ определяет расположение субтропической критической линии ветра (линия, где среднезональное значение скорости ветра переходит через 0), тем самым влияя на распространение планетарных волн в стратосферу. В результате во время западной фазы КДЦ наблюдается усиление полярного вихря, а во время восточной – его ослабление, что проявляется в продолжительности, масштабах и интенсивности разрушения стратосферного озона в период с конца зимы по весну. Границы полярного вихря представляют собой динамический барьер, препятствующий меридиональному переносу стратосферного озона из тропических и средних широт в полярную область (Manney et al., 1994; Sobel et al., 1997). При этом внутри полярного вихря при экстремально низких температурах (ниже -78° C) формируются полярные стратосферные облака (ПСО), на поверхности и в объеме которых протекают гетерогенные реакции с высвобождением молекулярного хлора. При появлении солнечного излучения над полярным регионом молекулярный хлор фотодиссоциирует с образованием радикалов хлора, вступающих в каталитический цикл разрушения озона (Finlayson-Pitts, Pitts, 2000). Арктические озоновые аномалии, формирующиеся во время восточной фазы КДЦ, как правило, наблюдаются в январе (после чего происходит разрушение полярного вихря), а во время западной — в период с февраля по апрель (Zuev et al., 2017).

Влияние КДЦ на полярные вихри было рассмотрено в ряде работ (Thomas et al., 2009; Camp, Tung, 2007; Hampson, Haynes, 2006; Pascoe et al., 2006; Naito, Yoden, 2006; Kinnersley, Tung, 1999; Naoe, Shibata, 2010; O'Sullivan, Young, 1992; Hu, Tung, 2002; Ruzmaikin et al., 2005; Агеева и др., 2017; Криволуцкий, Репнев, 2012; Погорельцев, Савенкова, 2010). Арктический полярный вихрь существенно более подвержен воздействию КДЦ, чем антарктический (Ford et al., 2009; Chen, Wei, 2009; Calvo et al., 2007; Niwano, Takahashi, 1998; Hitchman, Huesmann, 2009; Thomas et al., 2009; Погорельцев, Савенкова, 2010). В Арктике влияние КДЦ на динамику полярного вихря проявляется с зимы по весну, в то время как в Антарктике только поздней весной (с октября по декабрь) (Garfinkel, Hartmann, 2007; Klekociuk et al., 2011; Haigh, Roscoe, 2009). Происходящее при западной фазе КДЦ смещение критической линии ветра способствует расширению пояса ветров, господствующих в нижней тропической стратосфере, и последующему повышению температуры нижней субтропической стратосферы (Garfinkel et al., 2012). Потепление в субтропической стратосфере приводит к увеличению стратосферного меридионального температурного градиента и последующему усилению полярного вихря (Zuev, Savelieva, 2019a, 2019b).

Целью данной работы является исследование влияния фаз КДЦ на разных изобарических уровнях на динамику стратосферных полярных вихрей на основе спутниковых данных Goddard Space Flight Center NASA.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Работа осуществлена на основе спутниковых данных Goddard Space Flight Center (GSFC) NA-SA о средней скорости зонального ветра на 60° ю.ш./с.ш. для уровней 50, 30 и 10 гПа за период с 1979 по 2021 гг. (http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov). Среднемесячные данные о скорости зонального ветра на 60° ю.ш./с.ш. получены по данным Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), созданного Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS) на основе спутниковых данных GSFC NASA. MERRA-2 – это первый долгосрочный глобальный реанализ, который усваивает данные космических наблюдений за аэрозолями и представляет их взаимодействие с другими физическими процессами в климатической системе (Gelaro et al., 2017).

Значения средней скорости зонального ветра на 60° ю.ш./с.ш. используются для характеристики скорости ветра в области границ антарктического и арктического стратосферных полярных вихрей (https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/wind_2022_MERRA2_SH.html). Стратосферные полярные вихри, особенно арктический, как правило, не центрированы относительно полюса и могут занимать меньшую площадь, чем область внутри 60° ш. (т.е. их границы, особенно арктического, часто не совпадают с 60° ш.). Тем не менее, эта характеристика использовалась в работе для исследования влияния КДЦ на динамику полярных вихрей, поскольку влияние КДЦ распространяется главным образом на зональный ветер. что проявляется в динамике полярных вихрей.

Фазы КДЦ определялись по скорости зонального ветра на уровнях 10, 20, 30, 50 и 70 гПа в районе экватора поданным Института метеорологии, Берлин (Institute of Meteorology, Department of Earth Sciences; http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/strat/produkte/qbo/qbo.dat) (Baldwin et al., 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среднемесячные значения средней скорости зонального ветра на 60° ш. для уровней 50, 30 и 10 гПа усреднялись за период с 1979 по 2021 гг. отдельно для западной и восточной фаз КДЦ на уровнях 10, 20, 30, 50 и 70 гПа. Для анализа влияния фаз КДЦ на динамику полярных вихрей из средних значений скорости зонального ветра на 60° ш., усредненных за период с 1979 по 2021 гг. для западной фазы КДЦ, вычитались соответствующие значения для восточной фазы КДЦ. Полученные разности значений скорости зонального ветра приведены на рис. 1 и 2, соответственно для Южного и Северного полушария.

Как видно из рис. 1 наибольшая разность между значениями средней скорости зонального ветра на 60° ю.ш. для западной и восточной фаз наблюдается в весенний период: усиление антарктического полярного вихря во время западной фазы наблюдается с сентября по декабрь при определении фазы КДЦ по уровню 30 гПа. Это хорошо согласуется с другими исследованиями (Zuev, Savelieva, 2019a, 2019b), согласно которым антарктический полярный вихрь становится более подверженным влиянию внеполярной стратосферы в весенний и, особенно, поздневесенний период, в то время как зимой он достаточно устойчив. В свою очередь обратный результат проявляется при расчете разностей для фаз КДЦ на уровне 10 гПа, из чего можно сделать вывод о том, что уровень 10 гПа не подходит для расчета фаз КДЦ при определении влияния КДЦ на антарктический полярный вихрь. Из всей выборки минимальные изменения прослеживаются при расчете разностей для фаз КДЦ на уровне 70 гПа, соответственно этот уровень также не является определяющим во влиянии КДЦ на полярный вихрь. Разности, рассчитанные для фаз КДЦ на уровнях 50 и 20 гПа, отражают результаты, близкие к значениям разностей, рассчитанных для фаз КДЦ на уровне 30 гПа, но ниже последних. Таким образом, опираясь на спутниковые данные NASA GSFC о скорости зонального ветра на 60° ю.ш. за период с 1979 по 2021 гг., можно сделать вывод о том, что преобладающее влияние на линамику антарктического полярного вихря оказывают фазы КДЦ на уровне 30 гПа (при западной фазе наблюдается усиление вихря, при восточной - ослабление), что проявляется с сентября по декабрь, с ростом к ноябрю. Полученный вывод о периоде влияния КДЦ на антарктический полярный вихрь согласуется с результатами (Garfinkel, Hartmann, 2007).



Рис. 1. Разность значений средней скорости зонального ветра на 60° ю.ш. на уровнях 50, 30 и 10 гПа, усредненных за период с 1979 по 2021 гг. для западной и восточной фаз КДЦ на уровнях 10, 20, 30, 50 и 70 гПа.

Как видно из рис. 2, влияние КДЦ на арктический полярный вихрь наблюдается на протяжении всего периода его существования: с октября по апрель. Осенью и в первой половине зимы наблюдаются высокие значения разности между значениями средней скорости зонального ветра на 60° с.ш. для западной и восточной фаз КДЦ на уровнях 70 и 50 гПа, а весной — для фаз КДЦ на уровнях 20 и 10 гПа. В то время как влияние КДЦ на уровне 30 гПа прослеживается на протяжении всего периода существования арктического полярного вихря. Поскольку такой период влияния КДЦ согласуется с большинством исследований (Chen, Wei, 2009; Calvo et al., 2007; Niwano, Takahashi, 1998), то можно сделать вывод о том, что в Северном полушарии, как и в Южном, на динамику полярного вихря наибольшее влияние оказывают фазы КДЦ на уровне 30 гПа (западная фаза способствует усилению вихря, а восточная —



Рис. 2. Разность значений средней скорости зонального ветра на 60° с.ш. на уровнях 50, 30 и 10 гПа, усредненных за период с 1979 по 2021 гг. для западной и восточной фаз КДЦ на уровнях 10, 20, 30, 50 и 70 гПа.

ослаблению), что проявляется на протяжении всего периода существования вихря.

На рис. 3 приведены внутригодовые изменения значений средней скорости зонального ветра на 60° ю.ш./с.ш. на уровнях 50, 30 и 10 гПа, усредненных за период с 1979 по 2021 гг. для западной и восточной фаз КДЦ на уровне 30 гПа. Вследствие того, что арктический полярный вихрь значительно меньше антарктического по площади и, как правило, смещен относительно полюса, то значения средней скорости зонального ветра на 60° с.ш. значительно ниже соответствующих значений для 60° ю.ш. Антарктический полярный вихрь существует с апреля по ноябрь—декабрь, арктический вихрь существует с ноября по январь—апрель. Антарктический полярный вихрь в зимний период достаточно устойчив, а влияние КДЦ проявляется весной, особенно в октябре и ноябре (рис. 3). В то время как в динамике арктического полярного вихря значительное влияние

—●— Западная фаза КДЦ —●— Восточная фаза КДЦ



Рис. 3. Внутригодовой ход значений средней скорости зонального ветра на 60° ю.ш./с.ш. на уровнях 50, 30 и 10 гПа, усредненных за период с 1979 по 2021 гг. для западной и восточной фаз КДЦ на уровне 30 гПа.

КДЦ проявляется на протяжении всего периода его существования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе для исследования влияния фаз КДЦ на разных изобарических уровнях на динамику

стратосферных полярных вихрей использовались спутниковые данные GSFC NASA за период с 1979 по 2021 гг. Для характеристики скорости ветра в области границ полярных вихрей использовалась средняя скорость зонального ветра на 60° ш., поскольку влияние КДЦ проявляется именно на зональный ветер (таким образом, распространяясь на динамику полярного вихря). Были получены разности значений средней скорости зонального ветра на 60° ш. для западной и восточной фаз КДЦ (из средних значений для западной фазы вычитались средние значения для восточной фазы на разных изобарических уровнях). Показано, что преобладающее влияние на динамику полярных вихрей оказывает КДЦ на уровне 30 гПа (при западной фазе наблюдается усиление вихря, при восточной — ослабление). В динамике антарктического полярного вихря это проявляется с сентября по декабрь, особенно в октябре и ноябре, а в динамике арктического полярного вихря — на протяжении всего периода его существования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ // Изв. РАН. ФАО. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555. [Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and influence on NO₂ and O₃ total contents // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2017. V. 53. № 5. P. 477–486.

https://doi.org/10.1134/S0001433817050036]. https://doi.org/10.7868/S0003351517050014

Криволуцкий А.А., Репнев А.И. Результаты российские исследований средней атмосферы в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 3. С. 334–345. [Krivolutsky А.А., Repnev A.I. Results of Russian studies of the middle atmosphere, 2007–2010 // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2012. V. 48. № 3. Р. 299–308. https://doi.org/10.1134/S000143381203005X]. https://doi.org/10.31857/S0002-351555648-65

Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 11. С. 53–62.

Фролькис В.А., Кароль И.Л., Киселёв А.А. Существует ли связь между квазидвухлетними колебаниями атмосферы и изменениями содержания озона и температуры в Антарктиде? // Труды ГГО. 2021. № 601. С. 19–34.

Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinnersley J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M. The quasi-biennial oscillation // Rev. Geophys. 2001. V. 39. № 2. P. 179–229. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8217-7_4

Camp C.D., Tung K.-K. The influence of the solar cycle and QBO on the late-winter stratospheric polar vortex // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. \mathbb{N} 4. P. 1267–1283. https://doi.org/10.1175/JAS3883.1 *Chen W., Wei K.* Interannual variability of the winter stratospheric polar vortex in the Northern Hemisphere and their relations to QBO and ENSO // Adv. Atmos. Sci. 2009. V. 26. № 5. P. 855–863.

https://doi.org/10.1007/s00376-009-8168-6

Calvo N., Giorgetta M.A., Peña-Ortiz C. Sensitivity of the boreal winter circulation in the middle atmosphere to the quasi-biennial oscillation in MAECHAM5 simulations // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № 10. P. D10124. https://doi.org/10.1029/2006JD007844

Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.

Ford E.A.K., Hibbins R.E., Jarvis M.J. QBO effects on Antarctic mesospheric winds and polar vortex dynamics // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. № 20. P. L20801. https://doi.org/10.1029/2009GL039848

Garfinkel C.I., Hartmann D.L. Effects of the El Niño– Southern Oscillation and the Quasi-Biennial Oscillation on polar temperatures in the stratosphere // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № 19. P. D19112. https://doi.org/10.1029/2007JD008481

Garfinkel C.I., Shaw T.A., Hartmann D.L., Waugh D.W. Does the Holton–Tan mechanism explain how the quasibiennial oscillation modulates the Arctic polar vortex? // J. Atmos. Sci. 2012. V. 69. № 5. P. 1713–1733. https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0209.1

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

Holton J.R., Tan H.C. The influence of the equatorial quasibiennial oscillation on the global circulation at 50 mb // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. № 10. P. 2200–2208. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037 <2200:TIOTEQ>2.0.CO;2

Hampson J., Haynes P. Influence of the equatorial QBO on the extratropical stratosphere // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. N_{\odot} 3. P. 936–951.

https://doi.org/10.1175/JAS3657.1

Hu Y., Tung K.K. Tropospheric and equatorial influences on planetary-wave amplitude in the stratosphere // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. \mathbb{N} 2. P. 1019. https://doi.org/10.1029/2001GL013762

Hitchman M.H., Huesmann A.S. Seasonal influence of the quasi-biennial oscillation on stratospheric jets and Rossby wave breaking // J. Atmos. Sci. 2009. V. 66. № 4. P. 935–946. https://doi.org/10.1175/2008JAS2631.1

Haigh J.D., Roscoe H.K. The final warming date of the Antarctic polar vortex and influences on its interannual variability // J. Climate. 2009. V. 22. № 22. P. 5809–5819. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2865.1

Kinnersley J.S., Tung K.K. Mechanisms for the extratropical QBO in circulation and ozone // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. N° 12. P. 1942–1962.

https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1942: MFTEQI>2.0.CO;2

Klekociuk A.R., Tully M.B., Alexander S.P., Dargaville R.J., Deschamps L.L., Fraser P.J., Gies H.P., Henderson S.I., Javorniczky J., Krummel P.B., Petelina S.V., Shanklin J.D., Siddaway J.M., Stone K.A. The Antarctic ozone hole during 2010 // Aust. Meteorol. Ocean. 2011. V. 61. № 4. P. 253–267. https://doi.org/10.22499/2.6104.006

Manney G.L., Zurek R.W., O'Neill A., Swinbank R. On the motion of air through the stratospheric polar vortex // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. \mathbb{N} 20. P. 2973–2994. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2

Naito Y., Yoden S. Behavior of planetary waves before and after stratospheric sudden warming events in several phases of the equatorial QBO // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. \mathbb{N} 6. P. 1637–1649.

https://doi.org/10.1175/JAS3702.1

Naoe H., Shibata K. Equatorial quasi-biennial oscillation influence on northern winter extratropical circulation // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. № 19. P. D19102. https://doi.org/10.1029/2009JD012952

Niwano M., Takahashi M. The influence of the equatorial QBO on the Northern Hemisphere winter circulation of a GCM // J. Meteor. Soc. Jpn. 1998. V. 76. № 3. P. 453–461. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.76.3_453

O'Sullivan D., Young R. Modeling the quasi-biennial oscillation's effect on the winter stratospheric circulation // J. Atmos. Sci. 1992. V. 49. № 24. P. 2437–2448. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<2437: MTOBOE>2.0.CO;2

Pascoe C.L., Gray L.J., Scaife A.A. A GCM study of the influence of equatorial winds on the timing of sudden stratospheric warmings // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № 6. P. L06825.

https://doi.org/10.1029/2005GL024715

Ruzmaikin A., Feynman J., Jiang X., Yung Y.L. Extratropical signature of the quasi-biennial oscillation // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, № 11. P. D11111.

https://doi.org/10.1029/2004JD005382

Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge // J. Atmos. Sci. 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.

https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2

Thomas M.A., Giorgetta M.A., Timmreck C., Graf H.-F., Stenchikov G. Simulation of the climate impact of Mt. Pinatubo eruption using ECHAM5 – Part 2: Sensitivity to the phase of the QBO and ENSO // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. \mathbb{N} 9. P. 3001–3009.

https://doi.org/10.5194/acp-9-3001-2009

Thomas M.A., Timmreck C., Giorgetta M.A., Graf H.-F., Stenchikov G. Simulation of the climate impact of Mt. Pinatubo eruption using ECHAM5 – Part 1: Sensitivity to the modes of atmospheric circulation and boundary conditions // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. No 2. P. 757–769.

https://doi.org/10.5194/acp-9-757-2009

Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S. The role of the Mt. Merapi eruption in the 2011 Arctic ozone depletion // Atmos. Environ. 2017. V. 166. P. 327–333.

https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.040

Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // Dynam. Atmos. Oceans. 2019a. V. 87. P. 101097.

https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.101097

Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019b. V. 190. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.016

Influence of the Quasi-Biennial Oscillation on the Dynamics of the Stratospheric Polar Vortices According to Satellite Observations

V. V. Zuev¹, E. A. Maslennikova^{1, 2}, and E. S. Savelieva¹

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

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The duration of polar ozone depletion events depends on the phase of the quasi-biennial oscillation (QBO). The QBO determines the location of the subtropical critical wind line that influences the propagation of planetary waves into the stratosphere. As a result, the polar vortex intensifies during the western phase of the QBO and weakens during the eastern phase, which manifests itself in the timing, duration, and intensity of stratospheric ozone depletion. Polar ozone depletion occurs inside the strong polar vortex from late winter to spring due to the occurrence of heterogeneous and photochemical ozone destruction reactions in the presence of solar radiation. We studied the effect of QBO phases at different isobaric levels on the dynamics of the stratospheric polar vortices based on satellite data from the Goddard Space Flight Center NASA. It is shown that the QBO at the 30 hPa pressure level has a predominant effect on the dynamics of the polar vortices. This is observed from September to December, especially in October and November, in the dynamics of the Antarctic polar vortex, and throughout the entire period of its existence in the dynamics of the Arctic polar vortex.

Keywords: quasi-biennial oscillation, stratospheric polar vortices, zonal wind

REFERENCES

Ageyeva V.Y., Gruzdev A.N., Elokhov A.S., Mokhov I.I., Zueva N.E. Sudden stratospheric warmings: statistical characteristics and influence on NO₂ and O₃ total contents // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2017. V. 53. \mathbb{N} 5. P. 477–486. https://doi.org/10.1134/S0001433817050036

Krivolutsky A.A., Repnev A.I. Results of Russian studies of the middle atmosphere, 2007-2010 // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2012. V. 48. № 3. P. 299–308.

https://doi.org/10.1134/S000143381203005X

Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N. Mezhgodovaya i klimaticheskaya izmenchivost' srokov vesennej perestrojki cirkulyacii stratosfery [Interannual and climatic variability of breakup date of the stratospheric circulation] // Uchenye zapiski RGGMU. 2010. № 11. P. 53–62. (In Russian).

Frolkis V.A., Karol I.L., Kiselev A.A. Sushchestvuet li svyaz' mezhdu kvazidvuhletnimi kolebaniyami atmosfery i izmeneniyami soderzhaniya ozona i temperatury v Antark-tide? [In search of the correlation between quasi-biennial atmospheric fluctuations and ozon concentration and temperature changes in Antarctica] // Trudy GGO. 2021. № 601. P. 19–34. (In Russian).

Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinnersley J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M. The quasi-biennial oscillation // Rev. Geophys. 2001. V. 39. No 2. P. 179–229. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8217-7_4

Camp C.D., Tung K.-K. The influence of the solar cycle and QBO on the late-winter stratospheric polar vortex // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. № 4. P. 1267–1283.

https://doi.org/10.1175/JAS3883.1

Chen W., Wei K. Interannual variability of the winter stratospheric polar vortex in the Northern Hemisphere and their relations to QBO and ENSO // Adv. Atmos. Sci. 2009. V. 26. № 5. P. 855–863.

https://doi.org/10.1007/s00376-009-8168-6

Calvo N., Giorgetta M.A., Peña-Ortiz C. Sensitivity of the boreal winter circulation in the middle atmosphere to the quasi-biennial oscillation in MAECHAM5 simulations // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. No 10. P. D10124.

https://doi.org/10.1029/2006JD007844

Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. California: Academic Press, 2000. 969 p.

Ford E.A.K., Hibbins R.E., Jarvis M.J. QBO effects on Antarctic mesospheric winds and polar vortex dynamics // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. № 20. P. L20801. https://doi.org/10.1029/2009GL039848

Garfinkel C.I., Hartmann D.L. Effects of the El Niño– Southern Oscillation and the Quasi-Biennial Oscillation on polar temperatures in the stratosphere // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № 19. P. D19112.

https://doi.org/10.1029/2007JD008481

Garfinkel C.I., Shaw T.A., Hartmann D.L., Waugh D.W. Does the Holton–Tan mechanism explain how the quasibiennial oscillation modulates the Arctic polar vortex? // J. Atmos. Sci. 2012. V. 69. № 5. P. 1713–1733.

https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0209.1

Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S.,

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 5 2023

Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. V. 30. Nº 14. P. 5419–5454.

https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1

Holton J.R., Tan H.C. The influence of the equatorial quasibiennial oscillation on the global circulation at 50 mb // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. \mathbb{N} 10. P. 2200–2208. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2200: TIOTEO>2.0.CO;2

Hampson J., Haynes P. Influence of the equatorial QBO on the extratropical stratosphere // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. N_{2} 3. P. 936–951.

https://doi.org/10.1175/JAS3657.1

Hu Y., Tung K.K. Tropospheric and equatorial influences on planetary-wave amplitude in the stratosphere // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. No 2. P. 1019. https://doi.org/10.1029/2001GL013762

Hitchman M.H., Huesmann A.S. Seasonal influence of the quasi-biennial oscillation on stratospheric jets and Rossby wave breaking // J. Atmos. Sci. 2009. V. 66. № 4. P. 935–946. https://doi.org/10.1175/2008JAS2631.1

Haigh J.D., Roscoe H.K. The final warming date of the Antarctic polar vortex and influences on its interannual variability // J. Climate. 2009. V. 22. № 22. P. 5809–5819. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2865.1

Kinnersley J.S., Tung K.K. Mechanisms for the extratropical QBO in circulation and ozone // J. Atmos. Sci. 1999. V. 56. N_{P} 12. P. 1942–1962.

https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1942: MFTEQI>2.0.CO;2

Klekociuk A.R., Tully M.B., Alexander S.P., Dargaville R.J., Deschamps L.L., Fraser P.J., Gies H.P., Henderson S.I., Javorniczky J., Krummel P.B., Petelina S.V., Shanklin J.D., Siddaway J.M., Stone K.A. The Antarctic ozone hole during 2010 // Aust. Meteorol. Ocean. 2011. V. 61. № 4. P. 253–267. https://doi.org/10.22499/2.6104.006

Manney G.L., Zurek R.W., O'Neill A., Swinbank R. On the motion of air through the stratospheric polar vortex // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51, № 20. P. 2973–2994.

https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2973:OT-MOAT>2.0.CO;2

Naito Y., Yoden S. Behavior of planetary waves before and after stratospheric sudden warming events in several phases of the equatorial QBO // J. Atmos. Sci. 2006. V. 63. N° 6. P. 1637–1649.

https://doi.org/10.1175/JAS3702.1

Naoe H., Shibata K. Equatorial quasi-biennial oscillation influence on northern winter extratropical circulation // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. № 19. P. D19102. https://doi.org/10.1029/2009JD012952

Niwano M., Takahashi M. The influence of the equatorial QBO on the Northern Hemisphere winter circulation of a GCM // J. Meteor. Soc. Jpn. 1998. V. 76. № 3. P. 453–461. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.76.3_453

O'Sullivan D., Young R. Modeling the quasi-biennial oscillation's effect on the winter stratospheric circulation // J. Atmos. Sci. 1992. V. 49. № 24. P. 2437–2448. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<2437: MTQBOE>2.0.CO;2 *Pascoe C.L., Gray L.J., Scaife A.A.* A GCM study of the influence of equatorial winds on the timing of sudden stratospheric warmings // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. № 6. P. L06825. https://doi.org/10.1029/2005GL024715

Ruzmaikin A., Feynman J., Jiang X., Yung Y.L. Extratropical signature of the quasi-biennial oscillation // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № 11. P. D11111.

https://doi.org/10.1029/2004JD005382

Sobel A.H., Plumb R.A., Waugh D.W. Methods of calculating transport across the polar vortex edge // J. Atmos. Sci. 1997. V. 54. № 18. P. 2241–2260.

https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<2241:MOC-TAT>2.0.CO;2

Thomas M.A., Giorgetta M.A., Timmreck C., Graf H.-F., Stenchikov G. Simulation of the climate impact of Mt. Pinatubo eruption using ECHAM5 – Part 2: Sensitivity to the phase of the QBO and ENSO // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. \mathbb{N}_{9} 9. P. 3001–3009.

https://doi.org/10.5194/acp-9-3001-2009

Thomas M.A., Timmreck C., Giorgetta M.A., Graf H.-F., Stenchikov G. Simulation of the climate impact of Mt. Pinatubo eruption using ECHAM5 – Part 1: Sensitivity to the modes of atmospheric circulation and boundary conditions // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. No 2. P. 757–769. https://doi.org/10.5194/acp-9-757-2009

Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S. The role of the Mt. Merapi eruption in the 2011 Arctic ozone depletion // Atmos. Environ. 2017. V. 166. P. 327–333. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.040

Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // Dynam. Atmos. Oceans. 2019a. V. 87. P. 101097. https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.101097

Zuev V.V., Savelieva E. The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019b. V. 190. P. 1–5. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.016

____ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ __ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЛИТОСФЕРНЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИССИИ СНАМР НАД ЗАПАДНЫМ ГИМАЛАЙСКИМ СИНТАКСИСОМ И ОКРУЖАЮЩИМИ ТЕРРИТОРИЯМИ

© 2023 г. Д. Ю. Абрамова^{*a*}, Л. М. Абрамова^{*b*}, *

^аИнститут земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия ^bЦентр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Троицк, Россия *E-mail: labramova@igemi.troitsk.ru Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

Исследуется распределение литосферных магнитных аномалий над территорией Индо-Азиатской коллизии, в частности, области Тарима и Западного Гималайского синтаксиса (WHS), полученных по измерениям на германском спутнике Земли СНАМР в разные годы его миссии. Приводятся карты литосферных магнитных аномалий модуля полного вектора T_a для этих областей. Обсуждается отражение в аномальном магнитном поле последствий процесса субдукции Индийской литосферной плиты под Евразийскую плиту в контексте современных представлений о региональной геолого-тектонической структуре и геофизике. Наблюдаемое на картах Т_а изменение знака аномалий магнитного поля над северной частью Индийской плиты трактуется как результат мантийного прогрева нижней коры, подъема изотермы Кюри и, как следствие, потери исходной намагниченности низов земной коры. С целью детального изучения территории WHS и его окружения построены карты литосферного магнитного поля на возможно более низком уровне орбиты СНАМР, что позволило увеличить их разрешение за счет приближения к источникам поля. Обсуждается связь выявленных региональных аномалий с тектоническими процессами в этой сейсмически активной области и другими имеющимися к настоящему времени геофизическими данными. Интерпретация полученной информации показала, что образы литосферных магнитных аномалий четко коррелируют с современными представлениями о расположении крупномасштабных геолого-тектонических структур.

Ключевые слова: литосферные магнитные аномалии, измерения геомагнитного поля спутником СНАМР, Индо-Евроазиатская коллизия, Западный Гималайский синтаксис, Тарим **DOI:** 10.31857/S0205961423050020, **EDN:** XGGMCN

введение

Тектонические процессы, связанные с горообразованием при столкновении (субдукции) континентов, сыграли фундаментальную роль в геолого-тектонической эволюции Земли и являются предметом геологических, геофизических и геохимических исследований на протяжении последних ста лет. Тектоника плит, предложенная А. Вегенером в двадцатых годах прошлого столетия (Вегенер, 1925), дала объяснение многим особенностям и деталям современной геологической структуры и тектонической истории нашей планеты.

Литосферные магнитные аномалии (ЛМА) связаны со свойствами тектонических структур на больших глубинах и являются отражением геолого-тектонического строения самых нижних частей земной литосферы. Существенным преимуществом для построения и анализа карт магнитного поля над территориями, где затруднены, а зачастую и невозможны, приземные наблюдения, таких, например, как высокогорные системы Гималаев, Памира, Гиндукуша и Тянь-Шаня, является возможность использования для анализа и интерпретации огромных массивов спутниковых геомагнитных данных (Абрамова и др., 2022а, 2022б). На сегодняшний день это один из наиболее высокоточных, дешевых и доступных геофизических методов изучения глубинного строения нашей планеты.

Наиболее информативными при этом оказываются материалы геомагнитной съемки низколетящих околоземных спутников, в частности, германского спутника СНАМР (Reigber et al., 2002). Продолжавшаяся более чем 10 лет миссия аппарата позволила покрыть практически всю поверхность планеты равномерной сетью наблюдений. Высота полета СНАМРа в разные годы находилась в интервале 480—250 км над поверхностью геоида, что позволяет получать наборы экспериментальных данных для исследования структуры ЛМА на разных уровнях наблюдения над земной поверхностью.

Пространственное распределение аномального магнитного поля, полученное по измерениям спутников на высоте их орбит, можно рассматривать как некоторую региональную характеристику, указывающую на закономерности распределения различных типов крупных магнитных неоднородностей в литосфере. Тщательный анализ построенных на уровнях орбит карт литосферного магнитного поля показал, что такие наблюдения малочувствительны к приповерхностным геологическим структурам. В рассматриваемом диапазоне высот полета спутников фиксируются практически только низкочастотные литосферные магнитные аномалии интенсивностью от первых единиц до первых десятков нТл с пространственными размерами порядка 200-400 км, сравнимыми с высотой измерений (Hemant et al., 2005). Сушественно, что при этом отфильтровываются локальные магнитные аномалии. связанные с намагниченными породами, находящимися в верхних слоях земной коры. Таким образом, карты ЛМА, построенные по спутниковым данным, содержат информацию о современной намагниченности именно глубинных слоев литосферы, являясь образами региональных тектонических структур, и, кроме того, отражают геотермическую обстановку в их пределах (Gao et al., 2016).

Соответственно, параметры ЛМА, отражающие положение тектонических структур и их физические свойства, можно использовать для комплексных исследований совместно с другими геолого-геофизическими методами.

Исследования показывают, что крупномасштабные тектонические единицы — щиты, кратоны и зоны субдукции характеризуются положительными аномалиями (вызванными повышенной магнитной восприимчивостью), а бассейны и абиссальные равнины — отрицательными магнитными аномалиями, возникновение которых объясняется утонением коры и поднятием изотермы Кюри (Hemant et al., 2005).

Спутниковые карты ЛМА разных территорий, как правило, хорошо согласуются с выдвигаемыми геолого-геофизическими гипотезами и региональными моделями строения литосферы. Однако в некоторых регионах земного шара обнаруживаются несоответствия между предсказанными и измеренными значениями аномального поля. В частности, это проявляется при изучении погруженных под молодые платформы или осадочные слои древних дорифейских областей и активных магматических зон (Hemant et al., 2005). Такие аномалии часто указывают на закономерности распределения различных типов магнитных неоднородностей на большой глубине, свидетельствуют о "просвечивании" древних структур.

Зоны сочленения магнитных областей, по-видимому, являются отражением глубинных и долгоживущих разломов, на которых развивались авлакогены и депрессии.

В данной работе мы анализируем карты ЛМА над частью территории Восточной Азии, построенные по наблюдениям германского спутника СНАМР, которые были получены в 2008 и 2010 гг., а также исследуем связь аномалий со строением литосферы этого активного в тектоническом отношении региона, где происходит современное взаимодействие тектонических плит: Евразийской, Тихоокеанской, и Индийской.

Развиваемые нами технологии выделения литосферной части из измеренного спутниковыми магнитометрами суммарного магнитного поля, позволяют достаточно точно определять положение региональных магнитных аномалий, обусловленных намагниченностью глубоко погруженных слоев литосферы.

Для решения задачи было необходимо:

 – собрать, обобщить и привести к удобной для дальнейшей обработки форме данные геомагнитного поля, измеряемые спутником в околоземном пространстве;

 используя специально разработанные технологии, выделить из огромных массивов данных составляющие, наиболее адекватно характеризующие литосферное магнитное поле;

 построить карты распределения аномального магнитного поля региона;

 провести интерпретацию выделенных магнитных аномалий, сопоставить полученные результаты с имеющимися для этих областей геофизическими и геолого-тектоническими данными.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Основная проблема при получении адекватных параметров ЛМА состоит в корректном разделении суммарного магнитного поля, измеренного спутником СНАМР, на составляющие, связанные с физическими источниками, генерирующими эти поля, и выделении части, связанной с полем ЛМА, путем исключения из измеренных значений "ненужных" составляющих. Разумеется, удаляемые части поля, должны быть максимально адекватно описаны с помощью существующих на сегодняшний день математических моделей.

Технологии выделения литосферной части из измеренного суммарного магнитного поля, успешно проверены и были использованы ранее для построения карт ЛМА в различных регионах (Абрамова Д., Абрамова Л., 2014; Абрамова и др. 2020; 2022a, 20226).

Процесс выделения региональных ЛМА из спутниковых измерений магнитного поля сводится к следующим шагам:

 выбор из массивов экспериментальных данных, материалов, относящихся к изучаемой территории, их обобщение и приведение к удобной для дальнейшей обработки форме;

 выделение (с использованием специально разработанных технологий) из полученных массивов данных составляющей, наиболее адекватно характеризующей именно литосферное аномальное магнитное поле;

 – создание баз данных отдельных компонент аномального магнитного поля;

 построение карт пространственного распределения компонент аномального магнитного поля над заданной территорией.

В настоящее время в целях упрощения процесса обработки больших массивов информации, основываясь на большом опыте работы со спутниковыми материалами, мы дополнительно проводим тщательный предварительный отбор экспериментальных данных. Для анализа используются измерения поля только для витков, совершаемых спутником в ночное время (LT от 22:00 до 6:00 ч), и только в спокойные в магнитном отношении дни (магнитные индексы $k_p \le 1$ и $D_{st} \le 20$). Оценки показали, что данный подход не приводит к понижению точности определения значений аномального поля и существенно снижает время обработки.

Для анализа распределения ЛМА над изучаемой территорией были выделены и обработаны в соответствии с описанной выше методикой массивы геомагнитных данных спутника СНАМР за два года (2008 и 2010 гг.) его миссии, равномерно покрывающие сектор 60°-100° Е и 20°-44° N.

Большой объем материала позволил получить детальную информацию о пространственном распределении ЛМА модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a на различных уровнях наблюдения от ~350 до ~260 км.

На рис. 1 показаны примеры изменения значений T_a вдоль широты для нескольких витков полета спутника, полученные в результате обработки измеренных данных. Представлены серии графиков T_a для пролета спутника над двумя областями: Центральной (вверху) и Западным Гималайским синтаксисом¹ WHS (внизу). Числовой индекс кривой обозначает приблизительное значение долготы, над которой пролегала орбита спутника. Видно, что для различных территорий пространственное изменение поля литосферных



Рис. 1. Пример изменения значений полного вектора аномального литосферного магнитного поля T_a , вдоль витков спутника СНАМР над двумя областями: Индо-Азиатской коллизии: Центральной (вверху) и WHS (внизу). Обозначение каждой кривой — округленное значение долготы орбиты; горизонтальная шкала широта, градусы, вертикальная шкала — значение поля, нТл.

магнитных аномалий может отличаться очень сильно: так, например, в центральной части Тибета оно меняется вдоль широты незначительно, чего нельзя сказать о сильной его нестабильности над WHS.

Для исследуемой территории на основе измерений СНАМРа была создана база данных объемом порядка ~12 тыс. измерений каждой компоненты и модуля полного вектора поля, что позволяет эффективно использовать ее с целью последующего построения карт магнитных аномалий различных масштабов и различных степеней осреднения поля по площади.

При интерпретации карт ЛМА всегда уточняется вопрос надежности выделяемых аномалий, а именно, соответствует ли их детальность масштабу основных тектонических структур. В данной ситуации это делалось путем построения карт по нескольким независимым выборкам дан-

¹ Прим. Синтаксис (от греч. syntaxis – построение, порядок – резкое сокращение ширины складчатого пояса, отдельного орогена или складчатой зоны, сопровождающееся увеличением горизонтального сжатия.



Рис. 2. Главные геологические черты изучаемого региона (Huang, Zhao, 2006).

ных, благо спутниковые наблюдения предоставляют их в большом количестве. Только после того как аномалия воспроизводится в каждой из этих попыток и подтверждена как надежная, мы допускаем возможность ее интерпретации.

ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ИНДО-АЗИАТСКОЙ КОЛЛИЗИИ

Структура строения западной части исследуемой области, окружающей Западный Гималайский синтаксис, обусловлена, в основном, воздействием Индийской тектонической плиты, которое приводит к сокращению и поднятию Тибетского плато и образованию мощных горных систем, таких как Гималаи, Памир и Гиндукуш. Этой территории присущи очень сложная поверхностная топография, активные деформации земной коры и мощная сейсмическая и вулканическая активность (Wang et al., 2001).

На рис. 2 приведена карта, представляющая главные геологические черты изучаемого региона. Показанная область имеет чрезвычайно сложную структуру литосферы, составленную группами складчатых поясов, террейнов и кристаллических массивов (микроконтинентов) с докембрийским фундаментом (Добрецов и др., 2013).

Тектоническая активность здесь проявляется до сих пор, а ее природа приписывается межплитному взаимодействию и (или) мантийным процессам. Последствия этих процессов исследуются геологическими и геофизическими методами, привлекая внимание ученых всего мира (Molnar et al., 1987; Nelson et al., 1996; Yin, Harrison, 2000; Tapponnier et al., 2001; Wang et al., 2001; Huang, Zhao, 2006; Zhao, 2009; Bai et al., 2010; Sobel et al., 2011).

Обширные геолого-тектонические и геофизические исследования показали, что Индийская плита (ИП) погружается под Тибетское плато под относительно небольшим углом до глубин 200– 300 км. Расстояние по горизонтали от края субдуцирующей плиты составляет 500–700 км. Ее северный край к настоящему времени достиг блока Квантанг (QB). По данным GPS движение Индийской плиты относительно Евразийской на территории всего Тибетско-Гималайского орогена происходит с равномерной скоростью ~4 см/ год (Zhang et al., 2004; Huang, Zhao, 2006).



Рис. 3. *Т_а* над территорией Индо-Азиатской коллизии на высоте ~350 км. Аббревиатуры: IP, Индийская плита; HIMF, Гималаи; TIB, Тибет; АFGB, Афганский блок; PM, Памир; TAR, Тарим; TDJB, Таджикский блок; QB, Квантангский блок; WHS, EHS, Западный и Восточный синтаксисы, соответственно. Черная жирная линия показывает границы субдуцирующей Индийской плиты.

В связи с этим, тектоносфера характеризуется существенной пространственной неоднородностью и рядом ярких аномалий геофизических полей.

АНОМАЛЬНОЕ ЛИТОСФЕРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ИНДО-АЗИАТСКОЙ КОЛЛИЗИИ

Для целостного восприятия положения Западного Гималайского синтаксиса (WHS), расположенного в западной части территории Индо-Азиатской коллизии, рассмотрим построенную карту ЛМА для всей этой области и сделаем краткий обзор процессов, протекающих в ее пределах.

На рис. 3 показана карта T_a на высоте ~350 км над территорией, ограниченной координатами 24°—42° N и 64°—100° Е, полученная авторами по измерениям спутника СНАМР, выполненным в течение 2008 г. При построении использовано медианное осреднение по блокам размером 100 × 100 км средствами GMT, blockmedian. (Wessel, Smith, 2007).

На юге и юго-западе региона прослеживается масштабная положительная ЛМА, топографиче-

ски приуроченная к территории субдуцирующей Индийской плиты, ее границы обозначены черной жирной линией. На рис. 3 видно, что в обозначенных границей плиты пределах положительные значения магнитного поля фиксируются только над южной и юго-западной частями, а севернее происходит смена знака значений аномального поля с положительного на отрицательный.

Объяснение этого факта, по-видимому, состоит в следующем. Согласно имеющейся к настоящему времени гипотезе, описывающей происходящие здесь тектонические процессы, предполагается, что в верхней мантии над погруженной частью Индийской плиты образуется крупный мантийный клин. Вследствие этого горячий мантийный поток, а также поток флюидов, образующихся при глубинной дегидратации погружающейся части, вызывают подъем нагретого астеносферного материала, что приводит к утонению литосферы под этой территорией (Huang, Zhao, 2006).

Этот процесс вызывает значительные аномалии геофизических полей в литосфере: области повышенных и пониженных сейсмических ско-

ростей, чрезвычайно высокие значения теплового потока, аномалии электропроводности и магнитного поля.

Известно, что повышение теплового потока вызывает прогрев намагниченных пород нижней части земной коры до температуры ~580°, так называемой точки Кюри магнетита, когда исчезают их магнитные свойства (Lowes, 2007). В полосе широт порядка 24°-28° N наблюдается (рис. 3) линейная зона высокого градиента аномального магнитного поля. К югу от нее находится область плиты со значительной исходной намагниченностью нижней коры, однако севернее при погружении плиты происходит ее прогрев, подъем поверхности Кюри, что приводит к потере магнитных свойств. Эту градиентную зону, разделяющую области положительных и отрицательных аномалий, можно рассматривать как индикатор разности температур в нижней части земной коры: выше и ниже 580°C.

Центральное пространство на карте занимает обширная отрицательная ЛМА над территорией Тибета и окружающими его областями.

Тектоносфера Тибето-Гималайского орогена, сложившаяся в результате сложных глобальных тектонических процессов, характеризуется существенной пространственной неоднородностью. Здесь происходит прогрев литосферы, подъем поверхности Кюри, потеря магнитных свойств минералов нижней коры, и, как следствие, наблюдаются пониженные значения литосферного магнитного поля над всей территорией Тибета.

В северной части карты выделяется яркая положительная магнитная аномалия с центром с координатами ~38° N/80° Е над Таримской котловиной, расположенной на севере Тибетского нагорья. Тарим имеет форму линзы и окружен орогенными поясами, в его основании лежит докембрийский фундамент, перекрытый фанерозойским осадочным чехлом (Li, Mooney, 1998; Lu et al., 2008; Li et al., 2011; Gao, Fan, 2014). Точные границы фундамента неизвестны. Таримскую котловину оконтуривает разлом Алтын-Таг (тонкая черная линия на рис.3), имеющий протяженность ~2000 км, который образует северо-западную границу Тибетского нагорья с Таримской котловиной.

Интересно поведение границ положительной ЛМА над Таримской котловиной, довольно четких с западной и южной сторон, но с достаточно медленным изменением значений амплитуды поля, вытянутых в направлении к северо-востоку. Полученный результат указывает на то, что Таримский кристаллический массив не ограничен, как принято считать, областью "линзы", а имеет продолжение на северо-восток, т.е. "просвечивается" из-под осадочной толщи посредством аномального литосферного магнитного поля.

ЛМА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЗАПАДНОГО ГИМАЛАЙСКОГО СИНТАКСИСА

Для более детального анализа характеристик ЛМА над территорией, ограниченной координатами $28^{\circ}-42^{\circ}$ N/64°- 80° E, и включающей Западный Гималайский синтаксис (WHS), а также окружающие его области, были обработаны геомагнитные данные спутника СНАМР за 6 мес. 2010 г.

Эти дополнительные материалы, полученные в период плавного снижения аппарата до высоты ~260—270 км, относящиеся ко времени окончания его "жизни", дали возможность построить распределение ЛМА с более хорошим разрешением благодаря приближению уровня измерений к источникам магнитного поля в литосфере. На базе этих данных была построена серия карт компонент ЛМА исследуемой территории различных масштабов и параметров осреднения.

Западный Гималайский синтаксис, называемый также Памирским выступом, расположенный на северо-западе Тибетского нагорья возник, по современным представлениям, в результате столкновения самой северной оконечности субдуцирующей Индийской плиты с Евразийской плитой (Burtman, Molnar, 1993; Negredo et al., 2007; Sobel et al., 2011).

Сложно построенный в геолого-тектоническом плане WHS, а также прилегающие к нему области, в последние десятилетия являются предметом активных геолого-тектонических и геофизических исследований (Kosarev et al., 1993; Roecker et al., 1993; Ghose et al., 1998; Lei et al., 2002; Tiwari et al., 2009; Yang et al., 2009; Gao et al., 2016).

Общее представление о сложной тектонике этой области дает карта, приведенная на рис. 4 (Koulakov, Sobolev, 2006).

Западный Гималайский синтаксис (Памирский выступ) соединяет Гималаи с горами Тянь-Шань и отделяет котловину Тарим от Таджикского бассейна.

Движение Индийской плиты смещало ранее образовавшиеся коллизионные горы на север, где протянулась горная система Тянь-Шаня – сложный палеозойский ороген, активизировавшийся в течение неогена (Windley et al. 1990; Sobel et al., 2006). Столкновение Индийской плиты и Таджикско-Таримского бассейна разделило последний, первоначально непрерывный, на две части. Отделенный Таджикский бассейн, в основе которого лежит триасовая или юрская континентальная кора (Тарроппіеr et al., 1981; Burtman, Molnar, 1993; Brookfield, Hashmat, 2001) сейчас расположен к западу от WHS. К востоку от WHS находится



Рис. 4. Рельеф и основные тектонические особенности WHS и прилегающих территорий, (Koulakov, Sobolev, 2006).

рассмотренный в предыдущем разделе Таримский бассейн.

По мере движения Индийской плиты на север в течение последних 10 млн лет, WHS быстро развивался (Dewey et al., 1989). Ориентация разломов и геологических структур в синтаксисе Западных Гималаев и прилегающей к нему территории указывает на то, что в процессе продвижения на север Индийская плита блокируется жесткими Таримским бассейном на востоке и Таджикским бассейном на западе. Коровый материал плиты, вклиниваясь между этими двумя бассейнами, погружается под них, приводя к поднятию горной системы Памира, расположенной на самой северо-западной окраине Индо-Азиатской коллизионной зоны, вблизи WHS.

В регионе Тянь-Шаня и Памира часто происходят мощные землетрясения, это наиболее сейсмически активные области в Центральной Азии. Синтаксис и его окрестности являются одной из наиболее активных областей с мощной сейсмичностью (Koulakov, Sobolev, 2006; Mechie et al., 2012). Геологические исследования показывают также, что Тянь-Шань имеет очень сложное строение с наличием множества типов пород, что обусловлено происходившими в его геологической истории частыми и сложными тектоническими движениями, сопровождаемыми крупномасштабными извержениями вулканов. Интенсивная сейсмическая активность, значительные деформации земной коры в Тянь-Шаньском орогенном поясе могут быть связаны со сложной структурой и тектоникой в верхней мантии под этой областью. Это отражено в работах многих исследователей глубинной структуры и динамических процессов Тянь-Шаньского орогенного пояса (Chen et al., 1997; Cotton, Avouac, 1994; Ghose et al., 1998; Kosarev et al., 1993).

Рассмотреть, как особенности геолого-тектонического строения такого сложного региона и происходящих здесь процессов отражаются в образах поля литосферных магнитных аномалий, представляется, безусловно, интересным.

На рис. 5 представлено пространственное распределение ЛМА над западной частью Индо-Евразийской коллизионной зоны, в которую входит область WHS, на примере модуля полного вектора аномального магнитного поля T_a . При построении использовано медианное осреднение по блокам размером 20 × 20 км средствами GMT, blockmedian, (Wessel, Smith, 2007).

Рисунок 5 демонстрирует, что в литосферном магнитном поле на уровне ~260 км наблюдается необычайно сложная мозаичная структура крупных положительных и отрицательных аномалий. Рассмотрим их подробнее.

Крупная положительная ЛМА на юге приурочена к области, движущейся в северном направлении Индийской плиты (IP) (обозначена жирной черной линией). Амплитуда аномалии плавно понижается на север и, по мере приближения к WHS, меняет знак на отрицательный.

В полосе широт порядка $32^{\circ}-33^{\circ}$ N наблюдается зона высокого градиента аномального магнитного поля. К югу от нее, как и в случае ЛМА центральной части Индо-Евроазиатской коллизии, нижняя кора плиты обладает значительной исходной намагниченностью. Однако севернее коровый материал плиты при ее погружении прогревается, как сказано ранее, мантийным теплом, что вызывает повышение температуры намагниченных пород нижней части земной коры до ~580°, так называемой точки Кюри магнетита, и потерю магнитных свойств. Эти процессы, повидимому, присущи всей территории, связанной к Индо-Евроазиатской коллизией.

Построенное распределение поля ЛМА хорошо коррелирует с образами литосферных аномалий сейсмических скоростей, полученных по результатам сейсмических исследований (ГСЗ, томографии и др.) (Kosarev et al., 1993; Gao, Huang, 2000; Koulakov, Sobolev, 2006). Индийская плита на этих разрезах отчетливо отображается как высокоскоростная зона, погружающаяся под Тибетское плато до глубин 200–300 км.

Небольшая по величине положительная ЛМА над Таджикским блоком имеет овальную форму с плавным уменьшением амплитуды к востоку и, так же как в случае Индийской плиты, по мере приближения к WHS ее значения переходят в отрицательную область.

Несколько иначе выглядит западная часть положительной ЛМА над Таримом: в удаленной от WHS части она характеризуется, как и должно быть, существенными положительными значениями, но по мере приближения к области раздела с Таджикским бассейном границы магнитной аномалии принимают ступенчатый вид, и далее происходит плавный переход значений в отрицательную область. Ступенчатость перехода, возможно, обусловлена наличием в западной части Тарима поясов торошения и дробления отдельных блоков земной коры в местах его взаимодействия с Индийской плитой, что характерно для такого рода образов ЛМА в других активных зонах (Абрамова Д., Абрамова Л., 2014, Абрамова и др., 2019).

Распределение поля ЛМА, полученное по геомагнитным наблюдениям спутника СНАМР, демонстрирует, что вся огромная горная область, охватывающая территории Памира, южной части складчатой системы Тянь-Шаньского рифтогенного пояса, Афганского и Восточной части Таджикского блоков, а также западной части Тибетского плато, характеризуется отрицательными значениями. Особенность такого распределения ЛМА объясняется интенсивным движением Индийской плиты на север, столкновением и погружением ее под Таримский и Таджикский бассейны и, соответственно, прогревом намагниченного вещества коры процессами, проходящими глубоко в астеносфере.

Пониженные значения ЛМА хорошо согласуются с оценками положения уровня поверхности Кюри в этом регионе на глубинах менее 32 км (Gao et al., 2015; 2016), где магнитные минералы переходят из ферромагнитного состояния в парамагнитное. Это максимально проявляется в аномальном магнитном поле над территорией Памира, непосредственно над WHS, где наблюдается исключительно четкая отрицательная ЛМА.

Интересно, что всем зонам раздела архейских блоков, а именно, разломам QMF, KKF, MDF, KPF и, в особенности, складчатым областям, таким как Южный Тянь-Шань (S_TSH), свойственны пониженные уровни литосферного магнитного поля, что, по-видимому, также обусловлено сокращенной мощностью магнитоактивного слоя.



Рис. 5. *T_a* над территорией WHS на высоте 260 км. Аббревиатуры: IP, Индийская плита; TIB, Тибет; PMR, Памир; TAR, Тарим; TDZ, Таджикский блок; AFG, Афганский блок; S_TSH, Южный Тянь-Шань; WHS, Западный Гималайский синтаксис. Разломы: QMF, Киа Ман; SPF, Южный Памирский; MPF, Средний Памирский; NPF, Северный Памирский; MD, Май Данг; KPF, Ке Пин; KKF, Качи Куньлунь; HIMF, Гималаи. Черной жирной линией обозначена граница Индийской плиты.

Сейсмические исследования, выполненные в этом районе, показывают, что наиболее яркие отрицательные скоростные аномалии наблюдаются на глубинах до 100–150 км в литосфере Тибета и Памира и до глубин 80–120 км – в литосфере Тянь-Шаня (Koulakov, Sobolev, 2006). Именно в этих же областях зафиксированы наиболее интенсивные отрицательные литосферные аномалии, что еще раз подтверждает реалистичность полученных пространственных распределений аномального магнитного поля.

выводы

Анализ карт спутниковых литосферных магнитных аномалий над территорией Индо-Азиатской коллизии, и, в частности, области Тарима и Западного Гималайского синтаксиса, показывает, что параметры аномального геомагнитного поля отражают пространственное строение современных крупномасштабных геолого-тектонических структур исследуемой области.

Показано, что область высокого градиента ЛМА между южной и северной частями субдуцирующей Индийской плиты является индикатором положения зоны в которой вследствие мантийных процессов разогрева астеносферы происходит потеря магнитных свойств ферромагнитных минералов, составляющих нижнюю кору Земли.

Можно сделать заключение о целесообразности использования спутникового литосферного магнитного аномального поля в условиях труднодоступных высокогорных регионов при изучении тектоносферы сложно построенных и геодинамически активных регионов на примере западной части Индо-Азиатской коллизии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М. Литосферные магнитные аномалии на территории Сибири (по измерениям спутника СНАМР) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. С. 1081–1092.

Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов И.М., Филиппов С.В. Исследование литосферных магнитных аномалий Гренландско-Исландско-Фарерского вулканического комплекса по данным измерений на спутнике СНАМР // Геофизические исследования. 2019. Т. 20(2). С. 5–18.

https://doi.org/10.21455/gr2019.2-1

Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М. О возможностях использования спутниковых геомагнитных наблюдений в исследовании геолого-тектонического строения литосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 2. С. 69–81.

https://doi.org/10.31857/ S0205961420010029

Абрамова Д.Ю., Абрамова Л.М., Варенцов И.М. Аномальное литосферное магнитное поле над территорией Индо-Азиатской коллизии по данным спутника СНАМР // Исслед. Земли из космоса. 2022а. № 3. С. 55–65.

https://doi.org/10.31857/S0205961422030022

Абрамова Д.Ю., Филиппов С.В., Абрамова Л.М., Варенцов И.М. Литосферные магнитные аномалии над территориями крупных магматических провинций // Геофизические процессы и биосфера. 20226. Т. 21. № 1. С. 33–42.

https://doi.org/10.21455/GPB2022.1-2

Вегенер А. Происхождение материков и океанов. В кн.: Современные проблемы естествознания. М.: "Госиздат", 1925. 145 с.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 4. С. 469–499.

Bai D., Unsworth M.J., Meju M.A., Ma X., Teng J., Kong X., Sun Y., Sun J., Wang L., Jiang C., Zhao C., Xiao P., Liu M. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging // Nat. Geosci. Lett. 2010. V. 3. P. 358–362.

https://doi.org/10.1038/NGEO830S

Brookfield M.E., Hashmat A. The geology and petroleum potential of the North Afghan platform and adjacent areas (northern Afghanistan, with parts of southern Turkmeni-

stan, Uzbekistan and Tajikistan // Earth-Sci. Rev. 2001. V. 55. P. 41–71.

Burtman V.S., Molnar P. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir // GSA Spec. Pap. 1993. V. 281. P. 1–76.

Chen Y., Roecker S., Kosarev G. Elevation of the 410-km discontinuity beneath the central Tien Shan: Evidence for a detached lithospheric root // Geophys. Res. Let. 1997. V. 24. P. 1531–1534.

Cotton F, Avouac P. Crust and upper-mantle structure under the Tian Shan from surface wave dispersion // Phys. Earth Planet Inter. 1994. V. 84. P. 1–4.

Dewey J.F., Cande S., Pitman W.C. The tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone // Eclogae Geol. Helv. 1989. V. 82. P. 717–734.

Gao Z., Fan T. Intra-platform tectono-sedimentary response to geodynamic transition along the margin of the Tarim Basin, NW China // J. Asian Earth Sciences. 2014. V. 96. P. 178–193.

https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.08.023

Gao G., Kang G., Li G., Bai C. Crustal magnetic anomaly and Curie surface beneath Tarim Basin, China, and its adjacent area // Canadian J. Earth Sciences. 2015. V. 52(6). https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0204

Gao G., Kang G., Li G., Bai C., Wu Y. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // Acta Geod. et. Geoph. 2016. https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z

Gao R., Huang D., Lu D. Deep seismic reflection profile across the juncture zone between the Tarim basin and the west Kunlun mountains // Chin Sci. Bull. 2000. V. 45. P. 2281–2286.

Ghose S., Hamburger W., Virieux J. Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tian Shan of Kyrgyzstan, central Asia // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 2725–2748.

Hemant K., Maus S., Haak V. Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit. 2005. P. 249–254.

Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B09305.

https://doi.org/10.1029/2005JB004066

Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: Contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 4437–4448.

Koulakov I., Sobolev S. A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region // Geophys. J. Int. 2006. V. 164. P. 425–440.

Lei J., Zhou H., Zhao D. 3-D velocity structure of P-wave in the crust and upper-mantle beneath Pamir and adjacent region // Chin J. Geophys. 2002. V. 45. P. 802–811.

Li S., Mooney W.D. Crustal structure of China from deep seismic sounding profiles // Tectonophysics. 1998. V. 288. P. 105–113.

https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97) 00287-4

Li Z., Chen H., Song B., Li Y., Yang S., Yu X. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin in northwestern China // J. Asian Earth Sciences. 2011.

V. 42. P. 917–927.

https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.05.009

Lowes F. Geomagnetics spectrum, spatial. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. 2007. Springer. Berli. P. 350–353.

Lu S., Li H., Zhang C., Niu G. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments // Precambrian Res. 2008. V. 160. P. 94–107.

https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.025

Mechie J., Yuan X., Schurr B., Schneider F., Sippl C., Ratschbacher L., Minaev V., Gadoev M., Oimahmadov I., Abdybachaev U., Moldobekov B., Orunbaev S., Negmatullaev S. Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data // Geophys. J. Int. 2012. V. 188. P. 385–407.

Molnar P., England P., Martinod J. Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon // Rev. Geophys. 1987. V. 31. P. 357–396.

Negredo A., Replumaz A., Villasenor A., Guillot S. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region // Earth Planet Sci. Lett. 2007. V. 259. P. 212–225.

https://doi.org/10.1016/j.epsl.04.043

Nelson K., Zhao W., Brown L. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results // Science. 1996. V. 274. P. 1684–1696.

Reigber C., Lühr H., Schwintzer P. CHAMP mission status. 2002. Advances in Space Research V. 30 (2). P. 129–134. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4

Roecker S., Sabitova M., Vinnik L., Bormakov A., Golvanov I., Mamatkanova R. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the western and central Tian Shan // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № 15. P. 779–795.

Sobel E.R., Chen J., Heermance R.V. Late Oligocene-Early Miocene initiation of shortening in the Southwestern Chinese Tian Shan: implications for Neogene shortening rate variations // Earth Planet Sci Lett. 2006. V. 247. P. 70–81.

https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.048

Sobel E., Schoenbohm L., Chen J., Thiede R., Stockli D., Sudo M., Strecker M. Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: implications for Pamir orogenesis // Earth Planet Sci. Lett. 2011. V. 304. P. 369–378.

https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.012

Tapponnier P., Mattauer M., Proust F., Cassaigneau C. Mesozoic ophiolites, sutures, and large-scale tectonic movements in Afghanistan // Earth Planet Sci Lett. 1981. V. 52. P. 355–371.

Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan plateau // Science. 2001. V. 294. P. 1671–1677. Tiwari V.M., Rajasekhar R.P., Mishra D.C. Gravity anomaly, lithospheric structure and seismicity of west Himalayan syntaxis // J. Seismol. 2009. V. 13. P. 363–370.

Wang Q., Zhang P., Freymueller J., Bilham R., Larson K. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements // Science. 2001. V. 294. P. 574–577.

Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2., 2007. https://doi.org/gmt.soest.hawaii.edu

Windley B.F., Allen M.B., Zhang C., Zhao Z., Wang G. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia // Geology. 1990. V. 18.

https://doi.org/10.1130/0091-7613

P. 128-131.

Yang H., Teng J., Zhang X., Sun R., Ke X. Features of the deep geophysical field beneath the west Himalayan syntaxis // Pro-gr. Geophys. 2009. V. 24. P. 1975–1986.

https://doi.org/10.3969/j.issn1004-2903.2009.06.007

Yin A., Harrison T. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28. 21 p.

Zhang P., Wang M., Gan W., Burgmann R., Molnar P., Wang Q., Niu Z., Sun J., Wu J., Hanrong S., Xinzhao Y. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data // Geology. 2004. V. 32. P. 809–812. https://doi.org/10.1130/G20554.1

Zhao D. Multiscale seismic tomography and mantle dy-

namics // Gondwana Res. 2009. V. 15. P. 297–323.

Lithospheric Magnetic Anomalies According to the CHAMP Satellite Data over the Western Himalayan Syntaxis and Surrounding Areas

D. Yu. Abramova¹ and L. M. Abramova²

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Troitsk, Russia ²Geoelectromagnetic Research Centre, Shmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Troitsk, Russia

The spatial distribution of the lithospheric magnetic anomalies field obtained from the German Earth satellite CHAMP measurements for several years of its mission is investigated over the territory of the Indo-Asian collision, in particular, the Tarim region and the Western Himalayan Syntax (WHS). Maps of the total intensity T_a of the lithospheric magnetic field for these regions are give. The lithospheric magnetic anomalies field as a reflection of the consequences of the Indian lithospheric plate subduction under the Eurasian plate is discussed in the context of modern ideas about the regional geological and tectonic structure. The inversion of the magnetic anomalies sign over the northern part of the Indian Plate observed on T_a maps is supposed as a result of the lower crust heating due to mantle processes, the rise of the Curie isotherm and, as a consequence, the loss of the initial magnetization of the lower crust. In order to study in detail the WHS and surrounding territory, maps of the lithospheric magnetic anomalies field are constructed at the lowest level of CHAMP orbit which leads to increase their resolution by nearing to the field sources. The relationship of detected regional anomalies with tectonic processes in this seismically active area and with other available geophysical information is discussed. Interpretation of the revealed information shows that the images of lithospheric magnetic anomalies distinctly correlate with modern view at the large-scale geological and tectonic structures location.

Keywords: lithospheric magnetic anomalies, CHAMP satellite geomagnetic field observations, Indo-Asian collision zone, Western Himalayan Syntax, Tarim basin

REFERENCES

Abramova D.Yu., Abramova L.M. Lithospheric magnetic anomalies in the territory of Siberia (from measurements by the CHAMP satellite) // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55. № 7. P. 854–863.

Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov Iv.M., Filippov S.V. Issledovaniye litosfernykh magnitnykh anomaliy Grenlandsko-Islandsko-Farerskogo vulkanicheskogo kompleksa po dannym izmereniy na sputnike CHAMP // Geofizicheskiye issledovaniya. 2019. V. 20. № 2. P. 5–18. https://doi.org/10.21455/gr2019.2-1

Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M. Possible Use of Satellite Geomagnetic Observations in Geological and Tectonic Studies of Lithosphere Structure // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. V. 56. № 12. P. 1695–1704.

https://doi.org/10.31857/ S0205961420010029

Abramova D.Yu., Abramova L.M., Varentsov I.M. Anomalous lithospheric magnetic field over the Indo-Asian Collision Territory according to CHAMP satellite data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022a. V. 58. № 9. P. 1077–1085.

https://doi.org/10.31857/S0205961422030022

Abramova D.Yu., Filippov S.V., Abramova L.M., Varentsov I.M. Lithospheric Magnetic Anomalies over Large Igneous Province Territories // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022b. V. 58. P. 1208–1217. https://doi.org/10.21455/GPB2022.1-2

Bai D., Unsworth M.J., Meju M.A., Ma X., Teng J., Kong X., SunY., Sun J., Wang L., Jiang C., Zhao C., Xiao P., Liu M. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging // Nat. Geosci. Lett. 2010. V. 3. P. 358–362.

https://doi.org/10.1038/NGEO830S

Brookfield M.E., Hashmat A. The geology and petroleum potential of the North Afghan platform and adjacent areas (northern Afghanistan, with parts of southern Turkmenistan, Uzbekistan and Tajikistan // Earth-Sci. Rev. 2001. V. 55. P. 41–71.

Burtman V.S., Molnar P. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir // GSA Spec. Pap. 1993. V. 281. P. 1–76.

Chen Y., Roecker S., Kosarev G. Elevation of the 410-km discontinuity beneath the central Tien Shan: Evidence for a detached lithospheric root // Geophys. Res. Let. 1997. V. 24. P. 1531–1534.

Cotton F., Avouac P. Crust and upper-mantle structure under the Tian Shan from surface wave dispersion // Phys. Earth Planet Inter. 1994. V. 84. P. 1–4.

Dewey J.F., Cande S., Pitman W.C. The tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone // Eclogae Geol. Helv. 1989. V. 82. P. 717–734.

Gao Z., Fan T. Intra-platform tectono-sedimentary response to geodynamic transition along the margin of the Tarim Basin, NW China // J. Asian Earth Sciences. 2014. V. 96. P. 178–193.

https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.08.023

Gao G., Kang G., Li G., Bai C. Crustal magnetic anomaly and Curie surface beneath Tarim Basin, China, and its adjacent area // Canadian J. Earth Sciences. 2015. V. 52 (6). https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0204

Gao G., Kang G., Li G., Bai C., Wu Y. An analysis of crustal magnetic anomaly and Curie surface in west Himalayan syntaxis and adjacent area // Acta Geod. et. Geoph. 2016. https://doi.org/10.1007/s40328-016-0179-z

Gao R., Huang D., Lu D. Deep seismic reflection profile across the juncture zone between the Tarim basin and the west Kunlun mountains // Chin Sci. Bull. 2000. V. 45. P. 2281–2286.

Ghose S., Hamburger W., Virieux J. Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tian Shan of Kyrgyzstan, central Asia // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 2725–2748.

Hemant K., Maus S., Haak V. Interpretation of CHAMP crustal field anomaly maps using a geographical information system (GIS) technique // Earth Observation with CHAMP: Results from Three Years in Orbit. 2005. P. 249–254.

Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. B09305.

https://doi.org/10.1029/2005JB004066

Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: Contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 4437–4448.

Koulakov I., Sobolev S. A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir-Hindukush region // Geophys J. Int. 2006. V. 164. P. 425–440.

Lei J., Zhou H., Zhao D. 3-D velocity structure of P-wave in the crust and upper-mantle beneath Pamir and adjacent region // Chin J. Geophys. 2002. V. 45. P. 802–811.

Li S., Mooney W.D. Crustal structure of China from deep seismic sounding profiles // Tectonophysics. 1998. V. 288. P. 105–113.

https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97) 00287-4

Li Z., Chen H., Song B., Li Y., Yang S., Yu X. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin in northwestern China // J. Asian Earth Sciences. 2011. V. 42. P. 917–927.

https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.05.009

Lowes F. Geomagnetics spectrum, spatial. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism. 2007. Springer. Berlin. P. 350–353.

Lu S., Li H., Zhang C., Niu G. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments // Precambrian Res. 2008. V. 160. P. 94–107.

https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.025

Mechie J., Yuan X., Schurr B., Schneider F., Sippl C., Ratschbacher L., Minaev V., Gadoev M., Oimahmadov I., Abdybachaev U., Moldobekov B., Orunbaev S., Negmatullaev S. Crustal and uppermost mantle velocity structure along a profile across the Pamir and southern Tien Shan as derived from project TIPAGE wide-angle seismic data // Geophys. J. Int. 2012. V. 188. P. 385–407.

Molnar P., England P., Martinod J. Mantle dynamics, the uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian monsoon // Rev. Geophys. 1987. V. 31. P. 357–396.

Negredo A., Replumaz A., Villasenor A., Guillot S. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region // Earth Planet Sci. Lett. 2007. V. 259. P. 212–225.

https://doi.org/10.1016/j.epsl.04.043

Nelson K., Zhao W., Brown L. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH results // Science. 1996. V. 274. P. 1684–1696.

Reigber C., Lühr H., Schwintzer P., CHAMP mission status. 2002. Advances in Space Research V. 30 (2). P. 129–134. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4

Roecker S., Sabitova M., Vinnik L., Bormakov A., Golvanov I., Mamatkanova R. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the western and central Tian Shan // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № 15. P. 779–795.

Sobel E.R., Chen J., Heermance R.V. Late Oligocene-Early Miocene initiation of shortening in the Southwestern Chinese Tian Shan: implications for Neogene shortening rate variations // Earth Planet Sci Lett. 2006. V. 247. P. 70–81. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.048

Sobel E., Schoenbohm L., Chen J., Thiede R., Stockli D., Sudo M., Strecker M. Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: implications for Pamir orogenesis // Earth Planet Sci. Lett. 2011. V. 304. P. 369–378.

https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.012

Tapponnier P., Mattauer M., Proust F., Cassaigneau C. Mesozoic ophiolites, sutures, and large-scale tectonic movements in Afghanistan // Earth Planet Sci Lett. 1981. V. 52. P. 355–371.

Tapponnier P., Zhiqin X., Roger F., Meyer B., Arnaud N., Wittlinger G., Jingsui Y. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan plateau // Science. 2001. V. 294. P. 1671–1677.

Tiwari V.M., Rajasekhar R.P., Mishra D.C. Gravity anomaly, lithospheric structure and seismicity of west Himalayan syntaxis // J. Seismol. 2009. V. 13. P. 363–370.

Wang Q., Zhang P., Freymueller J., Bilham R., Larson K. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements // Science. 2001. V. 294. P. 574–577.

Wessel P., Smith W.H.F. The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2., 2007. https://doi.org/gmt.soest.hawaii.edu

Windley B.F., Allen M.B., Zhang C., Zhao Z., Wang G. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia // Geology. 1990. V. 18. P. 128–131. https://doi.org/10.1130/0091-7613

Yang H., Teng J., Zhang X., Sun R., Ke X. Features of the deep geophysical field beneath the west Himalayan syntaxis // Progr. Geophys. 2009. V. 24. P. 1975–1986.

https://doi.org/10.3969/j.issn1004-2903.2009.06.007

Yin A., Harrison T. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28. 21 p.

Zhang P., Wang M., Gan W., Burgmann R., Molnar P., Wang Q., Niu Z., Sun J., Wu J., Hanrong S., Xinzhao Y. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data // Geology. 2004. V. 32. P. 809–812. https://doi.org/10.1130/G20554.1

Zhao D. Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // Gondwana Res. 2009. V. 15. P. 297–323.

____ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ₌ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН ГИДРОТЕРМАЛЬНО-ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ WORLDVIEW-2 НА УЧАСТКЕ ТАЛМАН (ТАЛМАНСКАЯ ПЛОЩАДЬ, ЮГО-ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ, РОССИЯ)

© 2023 г. В. Т. Ишмухаметова^{*a*, *}, И. О. Нафигин^{*a*}, С. А. Устинов^{*a*}, Д. С. Лапаев^{*a*}, В. А. Минаев^{*a*}, В. А. Петров^{*a*}

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва, Россия *E-mail: geoivt@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.2022 г.

Работа направлена на практическое применение данных космической съемки для выбора перспективных участков при геолого-разведочных работах в условиях средне-низкогорного рельефа и резко континентального климата. Изложены результаты обработки и анализа данных WorldView-2 в пределах Талманской площади с целью выявления зон гидротермально-метасоматических изменений горных пород, перспективных на выявление золото-полиметаллического оруденения. Выбор площади исследования обусловлен достаточной геологической изученностью и отсутствием техногенных образований, влияющих на результат обработки материалов космической съемки. Для повышения спектральной информативности данных WorldView-2 использован метод отношения спектральных каналов, по результатам которого создан псевдоцветной RGB композит, отображающий спектральные характеристики объектов дневной поверхности Земли, в частности, минералов группы оксидов/гидроксидов, содержащих переходные ионы железа (Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}). Сопоставление результатов обработки спутниковых данных наряду с геологической информацией позволило идентифицировать спектральные аномалии, как индикаторы наличия околорудных изменений, являющихся важным поисковым критерием гидротермальных месторождений.

Ключевые слова: WorldView-2, спектральный анализ, минералогический индекс, гидротермальные изменения пород

DOI: 10.31857/S0205961423040048, EDN: XLHUKF

введение

Одним из важных направлений в дистанционном зондировании является минералогическое картирование с использованием материалов космической съемки, основанное на отличительных особенностях спектральных характеристик минералов и горных пород. Проведенные зарубежные исследования свидетельствуют об успешном применении данных дистанционного зондирования Земли в прогнозно-поисковых работах. Сенсоры космических аппаратов позволяют идентифицировать минералы и минеральные ассоциации гидротермальных изменений, связанных с различными типами рудной минерализации (Abdelsalam, 2000; Aydal, 2007; Crowley, 1989; Inzana, 2003; Kusky, 2002; Okada, 1993; Podwysocki, 1984; Rajesh, 2008; Ramadan, 2010; Rowan, 1977; Sabins, 1996, 1997).

Геологическая информативность данных World-View-2 заключается в высоком спектральном разрешении и наличии каналов VNIR диапазонов, позволяющих отображать подробные спектральные характеристики поверхностных объектов, в частности, минералов группы оксидов/гидроксидов, содержащих переходные ионы железа (Fe³⁺ и Fe³⁺/Fe²⁺), входящих в состав зон околорудных гидротермально измененных пород.

В качестве отработки методики применения данных WorldView-2 для картирования зон гидротермальных изменений пород, перспективных на выявление золото-полиметаллической минерализации, выбрана Талманская площадь. Главной особенностью геолого-структурного строения объекта является наличие скрытого полого погружающегося тела полиметаллических руд "стратиформного" типа в вулканогенно-осадочной толще юрского возраста (Калашников, 2019). Территория достаточно изучена комплексом геофизических, геохимических и горно-буровых работ, отсутствуют техногенные образования. Для месторождения Талман подсчитаны запасы, полиметаллические руды характеризуются высоким качеством и пригодны для подземной отработки (Асмодъ-

Главным критерием контроля и локализации золото-полиметаллического оруденения на площа-

численных рудопроявлениях и пунктах минера-

лизации (Тарабарко, 2000).

ди Талман является наличие крупных неоднократно активизированных систем крутопадающих разломов и гетерогенность разреза стратифицированных пород с контрастными физико-механическими свойствами, способствующими заложению послойных срывов и зон трещиноватости, а также сосредоточению мелких рудных тел, выходящих на поверхность и локализованных в крутопадающих разломах (рис. 2).

Рудные тела сопровождаются широкими ореолами (первые десятки метров) гидротермально измененных пород. Гидротермальные изменения, как дорудные (хлорит-карбонатные, кварц-мусковитовые), синрудные (кварц-серицит-сульфидные), так и пострудные (кварц-гидрослюдистые и каолинитовые), телескопированы и оторваны от рудных тел до первых десятков, иногда сотен, метров по тектоническим нарушениям и в сочетании с другими критериями могут быть использованы в качестве прямого поискового признака.

Руды, выявленные в осадочно-вулканогенной толще, представлены кварц-карбонат-сульфидными жилами и в разной степени сульфидизированными кварц-карбонат-гидрослюдистыми метасоматитами. Рудовмещающими породами являются андезибазальты, базальты, плагиоандезиты, сиенит-порфиры, конгломераты средне-позднеюрского возраста (Лукин, 2020).

В составе руд выделяются главные и второстепенные рудные, породообразующие и акцессорные минералы. Главные рудные первичные (гипогенные) минералы: галенит, сфалерит арсенопирит, пирит, марказит; второстепенные рудные первичные минералы: буланжерит-джемсонит, пирротин, блеклые руды, халькопирит, бурнонит; акцессорные рудные первичные минералы: золото, серебро. Главные рудные гипергенные минералы: гидроокислы железа, марганца, плюмбоярозит, скородит, церуссит, ковеллин. Главные породообразующие первичные минералы: полевые шпаты, кварц, карбонаты, хлорит, гидрослюды, анкерит, каолинит, барит, апатит, рутил. Главные гипергенные минералы: кальцит, каолинит (Асмодъяров, 2015).

В пределах исследуемой территории в вулканогенно-осадочной толще (андезибазальтах, андезитах, конгломератах и песчаниках), в субвулканических сиенит-порфирах и плагиоандезитах, в базальтах дайкового комплекса широкое распространение получили средне- и низкотемпературные метасоматиты березитовой и аргиллизитовой формаций, слагающие наиболее интенсивные ореолы (более 30%) в сопряжениях разнонаправленных тектонически ослабленных зон разных порядков. На удалении от тектонических нарушений ореолы метасоматитов становятся неконтрастными и составляют не более 3–5% площади пород.

яров, 2015; Калашников, 2019). Также выбор пло-

щади обусловлен тем, что месторождение Талман

рассматривается как эталон при проведении поис-

ковых работ на золото-полиметаллическое оруде-

нение для других перспективных участков со схо-

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

верной части Кличкинского золото-флюорит-по-

лиметаллического рудного района (Нойон-Толо-

гойский золото-полиметаллический рудный узел) в

степей юго-восточного Забайкалья. Значения абсолютных высот изменяются от 750 до 1053 м. От-

носительные превышения водоразделов над днищами долин достигают 250-400 м. На северных

склонах гор часто встречаются небольшие лесные

массивы, образованные березой, ольхой, осиной,

лиственницей с густым подлеском, южная экспо-

зиция склона покрыта только травянистым по-

кровом. В поймах ручьев редкие заросли кустар-

ников. Обнаженность на площади в целом удо-

континентальный со значительными колебания-

ми суточных и сезонных температур (Асмодъ-

площадь входит в состав Алгачинской подзоны

Аргунской структурно-формационной зоны. В ее

пределах распространены стратифицированные

образования верхнего протерозоя, представлен-

ные флишоидной песчано-глинистой формацией

венда, вулканогенно-осадочными отложениями

юры и нижнего мела, а также четвертичными

рыхлыми осадками русловых и озерных фаций.

Интрузивный магматизм выразился в становле-

нии плутонических, гипабиссального и субвулка-

нических комплексов пермского и средне-позд-

металлы Нойон-Тологойского рудного узла. Роль

ведущего минерагенетического фактора здесь иг-

рает Мулинская вулкано-тектоническая структу-

ра с выполняющими ее вулканитами мулинской

серии и интрузивными образованиями. С ними

Площадь Талман охватывает северо-западную часть площади наиболее перспективного на поли-

неюрского возрастов различного состава.

В металлогеническом отношении исслелуемая

влетворительная.

яров, 2015; Калашников, 2019).

Климат

района

резко

Рельеф низко-среднегорный, типичный для

юго-восточном Забайкалье, Россия (рис. 1).

Исследуемая площадь Талман расположена в се-

жими геологическими условиями (Назаров, 2017).



Рис. 1. Схема минерагенического районирования (Калашников, 2019 с дополнениями).

Обогащенные участки приурочены к тектонически проработанным контактам излившихся и осадочных пород. На поверхности минерализация представлена разнонаправленными окисленными прожилками мощностью от нитевидных до первых сантиметров. Ядра минерализованных зон представлены глинистыми лимонитизированными корами выветривания с выщелоченными сульфидами.

Подавляющая часть прогнозных ресурсов основных и попутных компонентов на площади



Рис. 2. Схематическая геологическая карта площади Талман (Асмодъяров, 2015).

Талман представлена первичными рудами. Окисленные руды имеют ограниченное распространение в пределах тектонических зон в условиях близповерхностного залегания рудных тел. Окисленные руды в большей степени характеризуются плюмбоярозит-ярозит-гидроокисным и, в меньшей степени — церуссит-миметезит-скородитовым типами, проявлены в приповерхностных условиях и являются остаточными. Количество их не превышает 8-10% общего объема рудной массы (Ас-модъяров, 2015).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Космический аппарат дистанционного зондирования земли WorldView-2 был запущен на орбиту земли 08 октября 2009 г. Его оптический сенсор собирает данные в 9 спектральных каналах с

ИШМУХАМЕТОВА и др.





динамическим диапазоном в 11 бит на пиксель (один канал широкого диапазона (панхроматический) и 8 каналов в VNIR диапазоне). Пространственное разрешение сцен WorldView-2 в панхроматическом режиме составляет 0.46 м/п, в мультиспектральном режиме – 1.84 м/п. Спектральные диапазоны каналов: панхроматический (0.45– 0.80 µm); мультиспектральные: фиолетовый или соаstal (0.40–0.45 µm), синий (0.45–0.51 µm), зеленый (0.51–0.58 µm), желтый (0.58–0.62 µm), красный (0.63–0.69 µm), крайний красный (0.70–0.74 µm), ближний инфракрасный-1 (0.77– 0.9 µm), ближний инфракрасный-2 (0.86–1.04 µm).

В данной работе использовалась безоблачная и бесснежная сцена WorldView-2 уровня обработки 2А от 29 октября 2017 г., любезно предоставлен-

ная компанией PROXIMA (www.gisproxima.ru) для научных исследований.

В рамках предобработки набора изображений WorldView-2 на первом этапе проведена радиометрическая калибровка с целью конвертации цифровых значений (DN) пикселей изображения к зарегистрированной сенсором интенсивности излучения в верхних слоях атмосферы (Iwasaki, 2005). Затем данные излучения преобразованы в отражательную способность посредством применения алгоритма атмосферной коррекции FLAASH, основанного на аэрозольной модели атмосферы MODTRAN (Fraser, 1987). Для дифференциации растительного покрова и почв рассчитаны улучшенный индекс растительности WorldView (WV-VI) и нормализованный разностный водный индекс (NDWI).

Окислы и гидроокислы железа представляют собой важную группу минералов для дистанционного зондирования из-за схожих, ярко выраженных, хорошо идентифицируемых полос поглощения в видимой и ближней ИК-областях спектра. К этой группе минералов относятся: гематит, магнетит, гетит, ильменит, ярозит, а также лимонит. Высокое спектральное разрешение WorldView-2 в диапазонах VNIR позволяет отображать подробные спектральные характеристики поверхностных объектов: зоны концентрации минералов группы оксидов/гидроксидов, содержащих переходные ионы железа (Fe^{2+} , Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}). Характеристики поглощения, связанные с Fe³⁺/Fe²⁺, содержат набор от 0.40 до 1.2 μm, которые соответствуют каналам 2, 3, 4, 6 и 8 WorldView-2 VNIR (Bedini, Mars, 2018; 2019; Sun, 2017). Характеристики поглощения, связанные с Fe³⁺, обычно составляют 0.49, 0.70 и 0.87 µm, в то время как Fe²⁺ проявляет свойства поглощения при 0.51, 0.55 и 1.20 µm (Clark, 1999; Gaffey, 1986; Hunt, 1977, 1799).

В соответствии со спектральными особенностями поглощения группы минералов, содержащей оксиды и гидроксиды железа, для VNIR каналов WorldView-2 применена технология отношения спектральных каналов (минералогических индексов). Она широко используется и развивается многими исследователями для картирования гидротермально измененных пород, подчеркивая неочевидные человеческому глазу спектральные характеристики или особенности геологических объектов (Eldosouky, 2019; Pour, 2018; Rajendran, 2018). Технология основана на отношении, где в числителе использован канал с высокими значениями коэффициента отражения той или иной группы минералов или конкретного минерала, а в знаменателе – канал с низким значением коэффициента отражения (Crowley, 1989; Kalinowski, 2004). В работе спектральные каналы подбирались исходя из особенностей поглощения и отражения минералов группы оксидов и гидроксидов железа (гематит, магнетит, гетит, ярозит и т.д.), так как некоторые главные первичные рудные минералы в своем химическом составе имеют Fe (пирит, арсенопирит), а продукты их выветривания представлены окислами и гидроокислами железа со второй и третьей валентностью.

Для картирования Fe^{3+}/Fe^{2+} использован минералогический индекс (b3*b4)/(b2*1000) (Segal, 1982); для картирования Fe^{3+} использован минералогический индекс (b4 + b2)/b3 (Pour, 2019); для картирования Fe^{2+} использован минералогический индекс (b6 + b8)/b7 (Pour, 2019). Далее подобран псевдоцветной RGB композит (рис. 3), который отображает классы геологических материалов, имеющих спектральные характеристики, связанные с оксидами/гидроксидами железа, где каналу R соответствует Fe^{3+} , каналу G соответствует Fe^{3+}/Fe^{2+} , каналу B соответствует Fe^{2+} . Тем самым, данная цветовая комбинация хорошо подчеркивает геоструктурные характеристики горных пород, связанные с гидротермальными изменениями. По мнению авторов, подобранный псевдо-цветной RGB композит является наиболее информативным для минералогического картирования исследуемой площади.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По предложенной методике обработки данных WorldView-2 и подобранному псевдо-цветному композиту RGB (рис. 3), полученное изображение представлено в виде карты распределения минералов группы оксидов/гидроксидов, содержащих переходные ионы железа (Fe^{2+} , Fe^{3+} и Fe^{3+}/Fe^{2+}), которая относит каждому пикселю минерал, условная вероятность появления которого в данной точке максимальна.

Учитывая одно из главных ограничений применения методов дистанционного зондирования в геологии, а именно глубину исследования поверхности, предлагаемая методика работы сводится к выявлению проявленности вторичных ореолов рассеяния на дневной поверхности, идентификации железа в почвах, в частности.

Наиболее благоприятные условия для образования вторичных наложенных ореолов рассеяния возникают при гипергенных изменениях полиметаллических месторождений. Вторичные наложенные ореолы рассеяния рудных месторождений способны проявляться при любой мощности рыхлых отложений (Миляев, 1988). В зоне гипергенеза железо представлено наибольшим количеством минералов (Зонн, 1982).

Главными источниками накопления железа в почвах являются первичные минералы почвообразующих пород. В них железо находится в закисных, окисных и гидроокисных соединениях. В результате выветривания и почвообразования железо из них высвобождается и переходит как в коллоидальные окисные, закисные и гидроокисные соединения, так и особенно во вторичные (глинистые) минералы. Из аморфного железа, появляющегося в результате разрушения первичных и вторичных минералов, образуются такие окисные и гидроокисные минералы, как гематит, гетит, маггемит и др. Гидроокись железа может образовывать с органическими кислотами подвижные формы комплексных соединений, способных перемещаться по профилю почвы. В почвах окси-



Puc. 3. Псевдо-цветной RGB композит по результатам метода отношения каналов WorldView-2 (R: (b4 + b2)/b3, G: (b3*b4)/(b2*1000), B: (b6 + b8)/b7).

ды и гидроксиды железа различаются термодинамической стабильностью: ферригидрит, фероксигит, лепидокрокит и гетит. Ферригидрит является предшественником других, более устойчивых (гидр)оксидов железа, в первую очередь, гематита и гетита. К термодинамически нестабильным относят все гидроксиды, кроме гетита, свидетельствующие об идущем в настоящее время оксидогенезе железа. С течением времени фероксигит может спонтанно переходить в гетит, а ферригидрит — в гематит или гетит. Среди оксидов железа наиболее стабильный и распространенный минерал — гематит; магнетит и маггемит менее устойчивы (Зонн, 1982; Водяницкий, 2010).

В условиях средне-низкогорного рельефа и резко континентального климата образование вторичных остаточных ореолов рассеяния связано с процессами гипергенеза, что соответствует зоне активного влаго- и массообмеиа вещества (Миляев, 1988).

В соответствии с изложенным, поисковой значимостью для фиксации области гипергенеза будет выявление спектральной аномалии соотвествующее желто-зеленому цвету (треугольник RGB Fe^{3+}/Fe^{2+} , рис. 3). На псевдо-цветном RGB композите (рис. 3) представлены две спектральные аномалии с желто-зеленым оттенком, которые, возможно, соответсвуют гипергенным литохимическим аномалиям. С учетом физико-географических условий и масштабом выявленной аномалии наибольший интерес представляет спектральная аномалия в южной части представленного изображения, в пределах приводораздельного пологого южного склона г. Талман, свидетельствующая о наличии процессов окисления.

Практически весь псевдо-цветной RGB композит предствлен в красно-фиолетовых оттенках. С точки зрения химизма — это свободные Fe^{3+} и Fe^{2+} . Fe^{2+} легко переходит в ионные растворы природных вод, способны перемещаться на далекие расстояния и не образуют комплексные ионы. Fe^{3+} образует труднорастворимые гидролизованные и сложные комплексные соединения.

Для заверки полученных результатов по обработанному космическиму снимку привлечены материалы из отчетов Росгеолфонда (Асмодъяров, 2015; Калашников, 2019; Назаров, 2017). К сожалению, с результатами геохимических работ (картографическими материалами) по площади Талман не удалось сравнить в связи с грифом "коммерческая тайна", но тем не менее, получен удовлетворительный результат по сравнению со схематической геологической картой площади Талман. Выбранному участку по космическому снимку, с соответствующей спектральной аномалией, соответствует участок с выявленными минерализованными зонами, вскрытыми канавами и скважинами (рис. 4).

Согласно полученному псевдо-цветному RGB композиту и следуя логике распределения элемента-индикатора железа, перспективный участок является подковообразной структурой (рис. 4). Перспективность выбранного участка также обусловлена наличием разлома с второстепенными разрывами и оперяющими трещинами, которые образуют тектонически ослабленные зоны, пересекающие проявление, играющие важную рудо-контролирующую роль.

Выявленная спектральная аномалия пространственно не совсем согласуется с минерализованными зонами, так как пологопадающие минерализованные зоны располагаются на глубинах от 30 до 320 метров от дневной поверхности, но соответсвует предполагаемым ореолам рассеяния продуктов метасоматоза и гипергенеза.

Согласно фондовым материалам (Асмодъяров, 2015; Калашников, 2019; Назаров, 2017) на поверхности минерализация представлена глинистыми лимонитизированными корами выветривания с выщелоченными сульфидами, которая на обработанном снимке WorldView-2 представлена в цветовой гамме в желтых, зелено-желтых оттенках. Вскрытые канавы на обработанном космическом снимке WorldView-2 также представлены в желтых, зелено-желтых оттенках, так как вскрывают зону окисления руд. По полученному снимку видны проведенные ранее геохимические работы по вторичным ореолам рассеяния. Ориентировка профилей выбрана на основании анализа геолого-структурного положения наиболее перспективных участков простирания установленных и предполагаемых тектонических нарушений, что также доказывает предложенную методику по выявлению спектральных аномалий, соответсвующих гипергенным литохимическим аномалиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют рассматривать спектральные аномалии зон, маркирующих околорудные изменения пород, в качестве индикатора для обоснования выбора участков детальных поисковых исследований в пределах перспективных площадей.

Использование предложенной методики для разбраковки существующей базы вторичных геохимических ореолов позволит:

 – ранжировать по перспективности постановки геолого-разведочных работ;

 провести переоценку ряда рудопроявлений и геохимических аномалий, которые требуют дальнейшего изучения.

Примененный метод обработки данных World-View-2 будет способствовать существенному снижению себестоимости работ при поисках скрытого золото-полиметаллического оруденения в условиях близповерхностного залегания рудных тел. Для России с ее обширными и труднодоступными территориями данные космической съемки высокого разрешения являются не только объективным фактором, отражающим текущее состоя-



Рис. 4. Предполагаемая схема распределения гидротермально-измененных пород, продуктов метасоматоза и гипергенеза на перспективной площади Талман.

ние и изменения природной среды, но и служат прекрасным информационным материалом для тематической обработки снимков с использованием современных методов и технологий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность компании PROXIMA (www.gisproxima.ru) за предоставленные изображения WorldView-2.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асмодъяров И.А., Брель А.И., Синявин В.И. и др. Поисково-ревизионные работы на золото-полиметаллическое оруденение в северной части Кличкинского золотополиметаллического рудного района (Забайкальский край) за 2012–2014 гг. Объект № 111-27(102-24). Отчет по Гос. контракту № К-01/12-6 от 20.03.12 г. Росгеолфонд № 515591. М., 2015.

Водяницкий Ю.Н. Соединения железа и их роль в охране почв. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2010. 155 с.

Зонн С.В. Железо в почвах (генетичнсекие и географические аспекты). М.: Наука, 1982. 209 с.

Калашников В.А., Лиханов В.Д., Четвериков М.Е. и др. Поисковые работы на золото-полиметаллическое оруденение в пределах Савва-Борзинского рудного узла (Забайкальский край). Росгеолфонд № 536243. М., 2019.

Лукин А.В. Паспорт № 205/5676, Объект учета Талман, 2020. 8 с.

Миляев С.А. Литохимические поиски полиметаллических месторождений. М.: Недра, 1988. 183 с.

Назаров А.А. Отчет о результатах работ по объекту № 630-17(111-23). Поисковые работы с оценкой песрпектив золото-полиметаллического оруденения основных руцдных районов и узлов Приаргунской структурно-формационной зоны (Забайкальский край). Росгеолфонд № 528679. М.: 2017.

Тарабарко А.Н. Закономерности размещения золотополиметаллического оруденения Мулинской рудномагматической системы // Геология, поиски и разведка рудных полезных ископаемых. 2000. № 24. С. 37–150.

Abdelsalam M., Stern R. Mapping gossans in arid regions with landsat TM and SIR-C images, the Beddaho Alteration Zone in northern Eritrea // J. Afr. Earth Sci. 2000. 30(4):903–916.

https://doi.org/10.1016/S0899-5362(00)00059-2

Aydal D., Ardal E., Dumanlilar O. Application of the Crosta technique for alteration mapping of granitoidic rocks using ETM+data: case study from eastern Tauride belt (SE Turkey) // Int. J. Remote Sens. 2007. 28(17):3895–3913. https://doi.org/10.1080/01431160601105926

Bedini E. Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar gold deposits, southeast Spain // Adv. Space Res. 2019. 63. 3346–3357.

https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.047

Clark R.N. Spectroscopy of rock and minerals and principles of spectroscopy. In Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing 3; *Rencz A.N.*, Ed.; John Wiley Sons: New York, NY, USA, 1999. P. 3–58.

Crowley J.K., Brickey D.W., Rowan L.C. Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: Mineral discrimination using relative absorption band-depth images // Remote Sens. Environ. 1989. 29. 121–134. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90021-7 *Eldosouky A.M., Sehsah H., Elkhateeb S.O., Pour A.B.* Integrating aeromagnetic data and Landsat-8 imagery for detection of post-accretionary shear zones controlling hydrothermal alterations: The Allaqi-Heiani Suture zone, South Eastern Desert, Egypt // Adv. Space Res. 2020. 65. 1008–1024. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.030

Fraser S.J., Green A.A. A software defoliant for geological analysis of band ratios // Int. J. Remote Sens. 1987. 8. 525–532.

Gaffey S.J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near-infrared (0.35-2.55 microns): Calcite, aragonite, and dolomite // Am. Mineral. 1986. 71. 151–162.

Hunt G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared // Geophysics. 1977. 42. 501–513. https://doi.org/10.1190/1.1440721

Hunt G.R., Ashley R.P. Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared // Econ. Geol. 1979. 74. 1613–1629.

Inzana J., Kusky T., Higgs G., Tucker R. Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. J Afr Earth Sci. 2003. 37:59–72. https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00071-X

Iwasaki A., Tonooka H. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR. IEEE Trans // Geosci. Remote Sens. 2005. 43. 2747–2751.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.855066

Kalinowski A., Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual; Technical Report; Geoscience Australia: Canberra, Australia, 2004. Available online: http://www.ga.gov.au/im-age_cache/GA7833.pdf (accessed on 12 August 2018)

Kusky T.M., Ramadan T.M. Structural controls on Neoproterozoic mineralization in the South Eastern Desert, Egypt: an integrated field, Landsat TM, and SIR-C/X SAR approach // J Afr Earth Sci. 2002. 35:107–121. https://doi.org/10.1016/S0899.5362(02)00029.5

https://doi.org/10.1016/S0899-5362(02)00029-5

Mars J.C. Mineral and Lithologic Mapping Capability of WorldView 3 Data at Mountain Pass, California, Using Trueand False-Color Composite Images, Band Ratios, and Logical Operator Algorithms // Econ. Geol. 2018. 113. 1587–1601. https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4604

Okada K., Segawa K., Hayashi I. Removal of the vegetation effect from LANDSAT TM and GER imaging spectroradiometer data. ISPRS J Photogramm Remote Sens. 1993. 48(6):16–27.

https://doi.org/10.1016/0924-2716(93)90052-O

Podwysocki M.H., Mimms D.L., Salisbury J.W., Bender L.V., Jones O.D. Analysis of Landsat-4 TM data for lithologic and image mapping purpose, Proceedings of Landsat-4 Science Investigations Summary. Greenbelt, Maryland. 1984. 2:35–39.

Pour A.B., Hashim M., Hong J.K., Park Y. Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: North-eastern Graham Land, Antarctic Peninsula // Ore Geol. Rev. 2019. 108. 112–133.

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.018

Pour A.B., Park Y., Crispini L., Läufer A., Kuk Hong J., Park T.-Y.S., Zoheir B., Pradhan B., Muslim A.M., Hossain M.S. et al. Mapping Listvenite Occurrences in the Damage Zones of Northern Victoria Land, Antarctica Using ASTER Satellite Remote Sensing Data // Remote Sens. 2019. 11. 1408.

https://doi.org/10.3390/rs11121408

Pour A.B., Park Y., Park T.S., Hong J.K., Hashim M., Woo J., Ayoobi I. Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // Polar Sci. 2018. 16. 23–46.

https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004

Pour A.B., Park T.S., Park Y., Hong J.K., Muslim A., Läufer A., Crispini L., Pradhan B., Zoheir B., Rahmani O., Hashim M., Hossain M.S. Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the Northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // Remote Sens. 2019. 11. 2430. https://doi.org/10.3390/rs11202430

Rajendran S., Sobhi N. ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman // Ore Geol. Rev. 2018. 88. 317–335.

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.014

Rajesh H.M. Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockole area, Northern Territory, Australia using Landsat ETM+ // Ore Geol Rev. 2008. 33:382–396.

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.02.003

Ramadan T.M., Abdel Fattah M.F. Characterization of gold mineralization in Garin Hawal area, Kebbi State, NW Nigeria, using remote sensing // Egypt J Remote Sens Space

Sci. 2010. 13:153–163.

https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2009.08.001

Rowan L.C., Goetz A.F.H., Ashley R.P. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images // Geophysics. 1977. 42(3):522–535.

https://doi.org/10.1190/1.1440723

Sabins F.F. Remote Sensing Principles and Interpretation. 3. New York, USA: Freeman & Co, 1996.

Sabins F.F. Remote sensing strategies for mineral exploration. In: *Rencz AE*, editor / Remote Sensing for the Earth Sciences. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997. P. 375–447.

Segal D. Theoretical Basis for Differentiation of Ferric-Iron Bearing Minerals, Using Landsat MSS Data / Proceedings of Symposium for Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology, Fort Worth, TX (1982). 949–951.

Sun Y., Tian S., Di B. Extracting mineral alteration information using Worldview-3 data // Geosci. Front. 201. 8. 1051–1062.

https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.10.008

Salehi T., Tangestani M. Large-scale mapping of iron oxide and hydroxide minerals of Zefreh porphyry copper deposit, using Worldview-3 VNIR data in the Northeastern Isfahan, Iran // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. December 2018. V. 73. P. 156–169.

Identification of Zones of Hydrothermally Altered Rocks Using WorldView-2 Data at the Talman Site (Talmanskaya Area, South-Eastern Transbaikal, Russia)

V. T. Ishmukhametova¹, I. O. Nafigin¹, S. A. Ustinov¹, D. S. Lapaev¹, V. A. Minaev¹, and V. A. Petrov¹

¹Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russia

The work is aimed at the practical application of satellite imagery data for the selection of promising areas for geological exploration in conditions of medium-low mountain relief and a sharply continental climate. The results of processing and analysis of WorldView-2 data within the Talmanskaya area are presented in order to identify zones of hydrothermal-metasomatic changes in rocks that are promising for the identification of gold-polymetallic mineralization. The choice of the study area is due to sufficient geological knowledge and the absence of technogenic formations that affect the result of processing satellite imagery materials. To increase the spectral information content of the WorldView-2 data, the spectral channel ratio method was used, as a result of which a pseudo-color RGB composite was created that displays the spectral characteristics of objects on the Earth's day surface, in particular, minerals of the oxide/hydroxide group containing transition-al iron ions (Fe³⁺ and Fe³⁺/Fe²⁺). Comparison of the results of processing satellite data along with geological information made it possible to identify spectral anomalies as indicators of the presence of near-ore changes, which are an important search criterion for hydrothermal deposits.

Keywords: WorldView-2, spectral analysis, mineralogical index, hydrothermal alteration of rocks

REFERENCES

Asmod'yarov I.A., Brel' A.I., Sinyavin V.I. et al. Poiskovo-revizionnye raboty na zoloto-polimetallicheskoe orudenenie v severnoj chasti Klichkinskogo zolotopolimetallicheskogo rudnogo rajona (Zabajkal'skij kraj) za 2012-2014 gg. Ob'ekt № 111-27 (102-24). Otchet po Gos.kontraktu № K-01/12-6 ot 20.03.12 g. Rosgeolfond № 515591. M., 2015. *Vodyanickij YU.N.* Soedineniya zheleza i ih rol' v ohrane pochv. M.: GNU Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva Rossel'hozakademii, 2010. 155 s.

Zonn S.V. ZHelezo v pochvah (genetichnsekie i geograficheskie aspekty). M.: Nauka, 1982. 209 s.

Kalashnikov V.A., Lihanov V.D., Chetverikov M.E. et al. Poiskovye raboty na zoloto-polimetallicheskoe orudenenie v predelah Savva-Borzinskogo rudnogo uzla (Zabajkal'skij kraj). Rosgeolfond № 536243. M., 2019.

Lukin A.V. Pasport № 205/5676, Ob'ekt ucheta Talman, 2020. 8 p.

Milyaev S.A. Litohimicheskie poiski polimetallicheskih mestorozhdenij. M.: Nedra, 1988. 183 p.

Nazarov A.A. Otchet o rezul'tatah rabot po ob'ektu № 630-17(111-23). Poiskovye raboty s ocenkoj pesrpektiv zoloto-polimetallicheskogo orudeneniya osnovnyh rucdnyh rajonov i uzlov Priargunskoj strukturno-formacionnoj zony (Zabajkal'skij kraj). Rosgeolfond № 528679. M., 2017.

Tarabarko A.N. Zakonomernosti razmeshcheniya zolotopolimetallicheskogo orudeneniya Mulinskoj rudno-magmaticheskoj sistemy // Geologiya, poiski i razvedka rudnyh poleznyh iskopaemyh. 2000. № 24. P. 37–150.

Abdelsalam M., Stern R. Mapping gossans in arid regions with landsat TM and SIR-C images, the Beddaho Alteration Zone in northern Eritrea // J Afr Earth Sci. 2000; 30(4):903–916.

https://doi.org/10.1016/S0899-5362(00)00059-2

Aydal D., Ardal E., Dumanlilar O. Application of the Crosta technique for alteration mapping of granitoidic rocks using ETM+data: case study from eastern Tauride belt (SE Turkey) // Int J Remote Sens. 2007; 28(17):3895–3913. https://doi.org/10.1080/01431160601105926

Bedini E. Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar gold deposits, southeast Spain // Adv. Space Res. 2019. 63. 3346–3357.

https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.047

Clark R.N. Spectroscopy of rock and minerals and principles of spectroscopy. In Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing 3; *Rencz, A.N.*, Ed.; John Wiley Sons: New York, NY, USA, 1999; P. 3–58.

Crowley J.K., Brickey D.W., Rowan L.C. Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: Mineral discrimination using relative absorption band-depth images // Remote Sens. Environ. 1989. 29. 121–134. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90021-7

Eldosouky A.M., Sehsah H., Elkhateeb S.O., Pour A.B. Integrating aeromagnetic data and Landsat-8 imagery for detection of post-accretionary shear zones controlling hydrothermal alterations: The Allaqi-Heiani Suture zone, South Eastern Desert, Egypt // Adv. Space Res. 2020. 65. 1008–1024. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.030

Fraser S.J., Green A.A. A software defoliant for geological analysis of band ratios // Int. J. Remote Sens. 1987. 8. 525–532.

Gaffey S.J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near-infrared (0.35-2.55 microns): Calcite, aragonite, and dolomite // Am. Mineral. 1986. 71. 151–162.

Hunt G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared // Geophysics. 1977. 42. 501–513. https://doi.org/10.1190/1.1440721

Hunt G.R., Ashley R.P. Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared // Econ. Geol. 1979. 74. 1613–1629.

Inzana J., Kusky T., Higgs G., Tucker R. Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. J Afr Earth Sci. 2003. 37:59–72. https://doi.org/10.1016/S0899-5362(03)00071-X

Iwasaki A., Tonooka H. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR. IEEE Trans // Geosci. Re-

mote Sens. 2005. 43. 2747-2751.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.855066

Kalinowski A., Oliver S. ASTER Mineral Index Processing Manual; Technical Report; Geoscience Australia: Canberra, Australia, 2004. Available online: http://www.ga.gov.au/im-age_cache/GA7833.pdf (accessed on 12 August 2018).

Kusky T.M., Ramadan T.M. Structural controls on Neoproterozoic mineralization in the South Eastern Desert, Egypt: an integrated field, Landsat TM, and SIR-C/X SAR approach // J Afr Earth Sci. 2002. 35:107–121. https://doi.org/10.1016/S0899-5362(02)00029-5

Mars J.C. Mineral and Lithologic Mapping Capability of WorldView 3 Data at Mountain Pass, California, Using Trueand False-Color Composite Images, Band Ratios, and Logical Operator Algorithms // Econ. Geol. 2018. 113. 1587–1601. https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4604

Okada K., Segawa K., Hayashi I. Removal of the vegetation effect from LANDSAT TM and GER imaging spectroradiometer data. ISPRS J Photogramm Remote Sens. 1993. 48(6):16–27.

https://doi.org/10.1016/0924-2716(93)90052-O

Podwysocki M.H., Mimms D.L., Salisbury J.W., Bender L.V., Jones O.D. Analysis of Landsat-4 TM data for lithologic and image mapping purpose, Proceedings of Landsat-4 Science Investigations Summary. Greenbelt, Maryland. 1984. 2:35–39.

Pour A.B., Hashim M., Hong J.K., Park Y. Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: North-eastern Graham Land, Antarctic Peninsula // Ore Geol. Rev. 2019. 108. 112–133.

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.018

Pour A.B., Park Y., Crispini L., Läufer A., Kuk Hong J., Park T.-Y.S., Zoheir B., Pradhan B., Muslim A.M., Hossain M.S. et al. Mapping Listvenite Occurrences in the Damage Zones of Northern Victoria Land, Antarctica Using ASTER Satellite Remote Sensing Data // Remote Sens. 2019. 11. 1408.

https://doi.org/10.3390/rs11121408

Pour A.B., Park Y., Park T.S., Hong J.K., Hashim M., Woo J., Ayoobi I. Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica // Polar Sci. 2018. 16. 23–46.

https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.02.004

Pour A.B., Park T.S., Park Y., Hong J.K., Muslim A., Läufer A., Crispini L., Pradhan B., Zoheir B., Rahmani O., Hashim M., Hossain M.S. Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the Northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland // Remote Sens. 2019. 11. 2430. https://doi.org/10.3390/rs11202430

Rajendran S., Sobhi N. ASTER capability in mapping of mineral resources of arid region: A review on mapping of mineral resources of the Sultanate of Oman // Ore Geol. Rev. 2018. 88. 317–335.

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.014

Rajesh H.M. Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockole area, Northern Territory, Australia using Landsat ETM+ // Ore Geol Rev. 2008. 33:382–396.

https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.02.003

Ramadan T.M., Abdel Fattah M.F. Characterization of gold mineralization in Garin Hawal area, Kebbi State, NW Nigeria, using remote sensing // Egypt J Remote Sens Space Sci. 2010. 13:153–163.

https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2009.08.001

Rowan L.C., Goetz A.F.H., Ashley R.P. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images // Geophysics. 1977. 42(3):522–535.

https://doi.org/10.1190/1.1440723

Sabins F.F. Remote Sensing Principles and Interpretation. 3. New York, USA: Freeman & Co; 1996.

Sabins F.F. Remote sensing strategies for mineral exploration. In: *Rencz AE*, editor / Remote Sensing for the Earth Sciences. New York: John Wiley & Sons, Inc; 1997. P. 375–447. *Segal D.* Theoretical Basis for Differentiation of Ferric-Iron Bearing Minerals, Using Landsat MSS Data / Proceedings of Symposium for Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology, Fort Worth, TX (1982): 949–951.

Sun Y., Tian S., Di B. Extracting mineral alteration information using Worldview-3 data // Geosci. Front. 2017. 8. 1051–1062.

https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.10.008

Salehi T., Tangestani M. Large-scale mapping of iron oxide and hydroxide minerals of Zefreh porphyry copper deposit, using Worldview-3 VNIR data in the Northeastern Isfahan, Iran // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. December 2018. V. 73 P. 156–169.

_ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ₋ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕГЕТАЦИИ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР ОТ РЕЛЬЕФА И ПОЧВ НА ВОСТОКЕ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

© 2023 г. В. В. Дорошенко*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук", Волгоград, Россия *E-mail: doroshenko-vv@vfanc.ru

Поступила в редакцию 16.12.2022 г.

Всего картографировано 7444 полей общей площадью 857.9 тыс. га на территории пяти восточных засушливых районов Ставропольского края. По состоянию на 2021 г. пашня занимает более 55% территории исследования и расположена преимущественно в западной ее части. Озимыми культурами занято 4693 поля общей площадью более 487 тыс. га (56.9% от общей площади полей). Картографирование контуров полей производилось на основе космоснимков "Sentinel-2" ("естественные цвета"). Расчет морфометрических характеристик полей производился на основе ЦМР "SRTM3". Маска озимых культур за период 2011–2021 гг. и еженедельные композиты с данными о значении NDVI за весну (март-май) были получены с помощью сервиса "Вега-Science". Площади выявленных по данным ДЗЗ полей сопоставимы с данными официальной статистики. Поля располагаются на землях с крутизной до 5°, преобладает крутизна $1-2^{\circ}$ (около 90% общей площади). Большинство полей имеют преобладающую южную экспозицию, поля с северной экспозицией отсутствуют. На территории зоны исследования расположено 13 родов почв, преобладают каштановые глубокие почвы. Средний NDVI за март-май 2011-2021 гг. показывает наибольшие значения на полях, расположенных на луговых почвах, наименьшие значения NDVI наблюдаются на солонцах и солончаках. Выявлено, что значение NDVI снижается при увеличении размеров поля, оптимальный размер поля — до 150 га. Наибольшие значения NDVI выявлены на полях с кругизной $1-2^\circ$, южной экспозицией и луговыми, каштановыми и светло-каштановыми почвами. Проанализировано влияние годовых сумм осадков на значение NDVI.

Ключевые слова: Ставропольский край, морфометрический анализ, геоинформационный анализ, данные дистанционного зондирования, озимая пшеница

DOI: 10.31857/S0205961423050044, EDN: XEAXXE

ВВЕДЕНИЕ

Отсутствие картографической основы для сельскохозяйственных угодий может приводить к нарушению агротехнических условий. Камеральная оценка состояния посевных площадей является оперативным и относительно нетрудоемким способом контроля качества сельскохозяйственных культур. Использование данных дистанционного зондирования Земли в сочетании с ГИСтехнологиями позволяет проводить оперативное картографирование контуров посевных площадей и с достаточной точностью оценивать морфометрические характеристики территории, при этом снижается трудоемкость подобных работ (Денисова, 2021). Использование спутниковых данных позволяет своевременно выявлять отклонения в росте и развитии культур и планировать корректирующие мероприятия (Комаров, 2021).

Исследования состояния посевов, касающиеся территорий юга европейской части России, как правило, рассматривают различные культуры, влияние почвенного покрова и агротехнических условий, но обычно морфометрические условия при анализе не учитываются (Шинкаренко и др., 2019, Трошко, 2022). Исследования (Комаров, 2021) показали, что в условиях аридного климата увеличение уклона поверхности поля приводит к снижению влагообеспеченности и, как следствие, снижению средней урожайности. На территории Ставропольского края подобные исследования практически не ведутся (Сторчак, Ерошенко, 2014). При этом оценка состояния озимых культур в весенний период являются основой для прогнозирования урожайности (Зинченко, 2013). Схожие исследования проводились на территории Республики Крым, а также за рубежом – в Китае, США и Украине (Филина, 2022, Justice, 2015, Pan, 2021). В них рассматривались методы выявления озимых культур и способы прогнозирования урожайности в зависимости от климатических условий.


Рис. 1. Область исследования.

Цель исследования заключалась в определении состояния озимых культур на различных типах почв и в различных морфометрических условиях с использованием камеральных геоинформационных методов, в том числе, спутниковых данных. Озимые культуры были выбраны для проведения исследования в связи с тем, что отсутствуют достоверные данные о датах сева других культур.

Зона исследования соответствует границам пяти восточных муниципальных районов Ставропольского края – Арзгирского, Курского, Левокумского, Нефтекумского, Степновского (рис. 1). Данная область на севере и востоке граничит с Республиками Калмыкия и Дагестан, имеюшими схожие климатические. почвенные характеристики и системы хозяйствования. Эта область находится в переходной зоне между полупустынной и степной природными зонами, в связи с чем растениеводство сопряжено с большими рисками и трудозатратами. Согласно агроклиматическому районированию, почти вся зона исследования находится в очень засушливом агроклиматическом районе, часть Курского и Степновского районов – в засушливом районе (Антонов, 2018).

Арзгирский и Степновский муниципальные районы имеют растениеводческую сельскохозяйственную специализацию. Левокумский, Нефтекумский и Курский районы в западной части являются преимущественно растениеводческими по специализации, но в восточной части большее распространение получает животноводство.

Исследуемая территория характеризуется относительно плоским рельефом, т.к. находится в границах Терско-Кумской низменности и Кумо-Манычской впадины (Юферев и др., 2022). Среднемноголетнее годовое количество осадков составляет 300—500 мм (по данным ближайших метеостанций в г. Южно-Сухокумск и г. Буденновск), но в последнее время отмечаются засушливые периоды и тренд к повышению среднегодовых температур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Из имеющихся в свободном доступе материалов дистанционного зондирования Земли были выбраны мультиспектральные спутниковые снимки "Sentinel-2" (пространственное разрешение 10 м), а также цифровая модель рельефа "SRTM" с пространственным разрешением 30 м и высотным разрешением 1 м.

Определение границ полей проводилось методом экспертного визуального дешифрирования на основании спутниковых снимков "Sentinel-2" с использованием комбинации спектральных каналов в красном, зеленом и синем диапазонах спектра, что соответствует представлению изображения в естественных цветах. Такая комбинация обеспечивает достаточную контрастность для визуального дешифрирования границ пашни и отделения ее от прочих категорий агроландшафта. Векторная маска полей позволяет более точно выделить область исследования при использовании разновременных растровых данных и сократить влияние нецелевых участков при расчетах средних характеристик каждого полигона (Зинченко, 2013; Денисова, 2020).

Выявление полей, занятых озимыми культурами, проводилось на основании растровой маски озимых культур, загруженной из сервиса "BEГA-Science" (http://sci-vega.ru/), в том числе, с учетом севооборотов на каждый год, т.к. крупные поля могут быть не полностью заняты одной культурой. Для увеличения точности оценки площадей и состояния растений маска использована на каждый год в период с 2011 по 2021 гг., т.к. распределение озимых культур изменялось.

На основе цифровой модели рельефа были рассчитаны морфометрические характеристики (крутизна поверхности и ориентация по сторонам света), средние значения этих показателей были присвоены каждому векторному объекту с использованием инструмента "Зональная статистика" (Лупян и др., 2021; Тесленок и др., 2020; Синельникова, 2022). Для анализа распределения полей в сочетании с распространением различных родов почв была проведена векторизация почвенной карты Ставропольского края и проведено наложение контуров полей (Национальный атлас..., 2011). В результате пересечения каждому объекту был присвоен атрибут, содержащий информацию о роде почв.

Для определения успешности ведения сельскохозяйственной деятельности на различных типах почв на примере озимых культур для каждого полигона с применением зональной статистики рассчитан средний весенний показатель NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Нормализованный вегетационный индекс). Исследования (Justice, 2015) показывают, что пик роста озимой пшеницы в различных странах и природных зонах зависит от накопления растениями тепловой энергии в течение вегетационного периода и приходятся на период с апреля по май. Сервис "Bera-Science" позволяет загружать растровые материалы на основе данных MODIS (пространственное разрешение 250 м). Основным преимуществом данных MODIS является высокая повторяемость съемки, что имеет большое значение для проведения исследования, учитывающего значения каждой недели в определенный период года (Pan, 2021). Для вычисления среднего весеннего NDVI за период с 2011 по 2021 гг. полученные растровые материалы, представляющие собой еженедельные композиты со значениями

NDVI в каждом пикселе, были объединены в мультивременной композит с сохранением средних значений индекса за март, апрель и май для каждого года в соответствии с периодом активной вегетации т.е. до начала колошения (Берденгалиева, Берденгалиев, 2022). Средние показатели всех композитов NDVI были внесены в таблицу атрибутов векторного слоя, содержащего контуры полей, занятых озимыми, с учетом изменений севооборота, с помощью инструмента "Зональная статистика" (по параметру "среднее"). Необходимо отметить, что в сведениях о пространственном распределении озимых культур по материалам "BEГА-Science" отсутствуют данные за 2015-2017 гг., что связано с недостатком данных (Берденгалиева, Берденгалиев, 2022). В данных официальной статистики муниципальных образований, использованных для проверки качества выявления озимых культур дистанционными методами (https://www.gks.ru/dbscripts/munst/), отсутствуют показатели за 2012 и 2021 гг.

Данные о годовых суммах осадков были получены с помощью метеорологического сервиса АИСОРИ (Автоматизированная информационная система обработки режимной информации, http://meteo.ru/it/178-aisori) откуда были выгружены значения о количестве атмосферных осадков за каждый месяц года по метеостанциям в следующих населенных пунктах: г. Буденновск, г. Южно-Сухокумск, г. Элиста, г. Зеленокумск, г. Арзгир, с. Наурская (рис. 1). По полученным результатам проведена интерполяция (методом обратно взвешенных расстояний) для получения непрерывного поля сумм осадков, в связи с чем зона исследования была разделена на зону с годовой суммой осадков до 400 мм и зону с годовой суммой осалков 400-500 мм. Анализ среднего весеннего показателя NDVI был проведен для каждой зоны отдельно.

Обработка растровых данных, дешифрирование космических снимков, оверлейные операции с векторными объектами и создание итоговых картографических материалов проводились в геоинформационной среде "QGIS". Статистическая обработка проводилась в среде "MS Excel".

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам дешифрирования составлен тематический векторный слой, содержащий контуры всех полей в исследуемых пяти муниципальных районах по состоянию на 2021 г. Всего выделено 7444 объекта. Для полей автоматически рассчитана площадь (табл. 1). Общая площадь выделенных полей составила 857.9 тыс. га.

Поля занимают наибольшую долю общей площади в Арзгирском и Степновском муниципальных районах, наименьшую – в Нефтекумском

ДОРОШЕНКО

Муниципальный район	Общая площадь района (тыс. га)	Площадь полей (тыс. га)	Доля полей в районе (%)	Площадь полей, занятых озимыми в 2021 г. (тыс. га)	Доля полей, занятых озимыми (%)
Арзгирский	338.3	239.6	70.8	120.4	50.3
Курский	369.4	170.1	46.1	132.4	77.8
Левокумский	468.7	199.4	42.6	89.9	45.1
Нефтекумский	379.7	116.0	30.6	65.1	56.1
Степновский	188.7	132.8	70.4	79.9	60.2

Таблица 1. Распределение полей и озимых культур в муниципальных районах по состоянию на 2021 год

муниципальном районе. Такое распределение связано, в том числе, с распространением естественного увлажнения на исследуемой территории. В связи с этим северо-восточная часть Левокумского и Нефтекумского муниципальных районов имеет скотоводческую специализацию, в частности, в этой области распространено разведение овец и коз.

На основании полученных с помощью цифровой модели рельефа морфометрических характеристик была создана схема распределения полей по крутизне поверхности и экспозиции (рис. 2). Для наглядности отображения ориентации полей по сторонам света выделено 4 румба.

Абсолютное большинство полей (89.8% от общей площади полей) имеют крутизну до 2° и южную

экспозицию, что связано с общими для Терско-Кумской низменности характеристиками рельефа – преобладающим уклоном на юг и юго-восток, к побережью Каспийского моря, а также плоским рельефом (Юферев и др., 2022). Поля с самыми значительными уклонами располагаются вблизи балок и русел рек. Наименьшую площадь (0.04%) занимают поля с крутизной поверхности от 5° до 6° (табл. 2).

Распределение полей по сторонам света с использованием четырех румбов показывает малую долю восточной и западной экспозиции (3.9 и 1.3% соответственно). Поля с северной экспозицией отсутствуют.

Распределение полей по родам почв (рис. 3) неравномерное, наиболее распространенными



Рис. 2. Схема распределения полей по экспозиции (слева) и крутизне уклонов (справа).

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕГЕТАЦИИ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР

Экспориция	Крутизна							
экспозиция	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	Σ (га)	
В	_	18806.6	13719.4	987.4	199.4	_	33712.8	
Ю	539.7	746983.5	60790.8	3385.3	1285.3	208.3	813 192.9	
3	_	4949.6	5877	85	19	114.1	11044.7	
Σ (га)	539.7	770739.7	80387.2	4457.7	1503.7	322.4	857950.4	

Таблица 2. Распределение площадей полей по пространственной ориентации и крутизне уклонов

являются каштановые глубокие (340 тыс. га), светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые (264 тыс. га) и темно-каштановые глубокие (230 тыс. га), при этом среди занятых полями с озимыми культурами каждый год наибольшее распространение получают каштановые глубокие, темно-каштановые глубокие и светло-каштановые глубокие почвы. В зоне с годовой суммой осадков менее 400 мм располагается 3571 поле общей площадью 401 тыс. га (46.7% от общей площади полей). При этом средняя площадь поля в данной зоне больше (112.3 га), чем в зоне с годовой суммой осадков 400–500 мм (100.1 га).

Данные о наличии озимых культур на полях, полученные из сервиса "ВЕГА-Science", показа-



Рис. 3. Расположение полей на различных типах почв.



Рис. 4. Динамика площадей, занятых озимыми культурами, по данным дистанционного зондирования и статистики муниципальных образований с 2011 по 2021 гг.

ли, что за период исследования (2011–2021 гг.) озимыми культурами было занято от 252 до 487 тыс. га (от 29.4 до 56.8% общей площади полей). Соотношение площадей озимых, полученных по данным ДЗЗ и отраженных в официальной статистике муниципальных образований отражено на графике (рис. 4).

Поскольку в данных присутствует большое число пропусков, анализ соотношения затруднен. В 2013 и 2014 гг. разница между официальными данными и данными, полученными в результате дешифрирования, составила менее 10 тыс. га. Разрыв значительно увеличился в период с 2018 по 2020 гг., но это объясняется отсутствием в официальных источниках данных о площадях озимых культур для Нефтекумского района. Если вычесть площади, занятые озимыми культурами в Нефтекумском районе, из общей площади озимых, полученной по данным ДЗЗ, разрыв в указанные голы составляет менее 20 тыс. га. Малая ошибка определения площадей по данным ДЗЗ (до 5%) позволяет оценивать дистанционные данные как объективные. Опыт автоматизированного выявления площадей, занятых озимыми культурами, полученный за рубежом, показывает, что использование данных MODIS может приводить к тому, что небольшие по площади поля (менее 3 га) могут быть не распознаны как занятые озимыми (Pan, 2021).

Средние значения NDVI за весенний период (с марта по май) были рассчитаны с использованием композитных изображений, учитывающих средние показатели индекса для каждого пикселя и поля. При анализе таких значений в комплексе с данными о количестве осадков необходимо учитывать, что сумма зимних и осенних осадков (сентябрь-февраль) оказывает непосредственное влияние на произрастание озимых культур весной следующего года (Денисов и др., 2021; Середа и др., 2020). На графике (рис. 5) показаны средние весенние значения NDVI для полей с озимыми культурами по зонам различного увлажнения — зоны с годовой суммой осадков менее 400 мм и зоны с годовой суммой осадков от 400 до 500 мм. Также показаны среднемноголетние суммы осадков за рассматриваемый период для весеннего, осеннего и зимнего периодов без разделения на зоны (в связи с большим количеством разрывов в данных с метеостанций).

При разделении территории исследования на зоны в соответствии с годовыми суммами осадков (рис. 3) была выявлена зависимость, отражающаяся в том, что среднее весеннее значение NDVI в зоне с годовой суммой осадков 400—500 мм выше в каждый год периода исследования. Превышение значений индекса составляет от 0.006 до 0.15 и может показаться незначительным, но его необходимо учитывать при анализе состояния озимых культур в переходной зоне между полупустыней и степью.

Также следует отметить, что полученная в результате интерполяции данных о суммах осадков с окружающих метеостанций граница двух зон является условной. Также полученные результаты соотносятся с обновленным агроклиматическим районированием, проведенным в 2017 г. (Антонов, 2018).

Среднемноголетнее весеннее значение NDVI всех полей за период с 2011 по 2021 гг. составляет 0.49. Оценка интенсивности вегетации озимых



Рис. 5. График соотношения средних весенних значений NDVI и количества осадков (I – зона с годовой суммой осадков <400 мм; II – зона с годовой суммой осадков 400–500 мм).

культур проводилась на основании усредненного NDVI за весенний период (март-май) в интервале 2011-2021 гг. для каждого полигона. Наибольшее среднее значение NDVI для озимых культур за рассматриваемый период года наблюдается в Курском муниципальном районе (0.53). Наименьшее значение – в Левокумском муниципальном районе (0.45). Высокое значение индекса в Нефтекумском районе (0.51), несмотря на неблагоприятные гидротермические и почвенные условия, может объясняться развитой сетью ирригационных каналов и большим количеством орошаемых полей. Схожее распределение индекса получено при проведении подобного исследования для всей территории Ставропольского края за период 2003-2013 гг. (Сторчак, Ерошенко, 2014). Согласно данным (Письменная, Азарова, 2021), в которых подробно анализировалось состояние озимых культур на небольшом участке территории Ставропольского края, отнесенному к засушливой зоне, с проведением стационарного метеорологического мониторинга, высокие показатели NDVI в 2020 и 2021 гг., противоречащие снижению количества осадков, не связаны с хорошим состоянием озимых культур. Влияние оказали низкая сумма осадков предшествующей осенью и малоснежная зима с относительно высокими температурами, которые привели к вегетации озимых культур в течение всего сезона и сдвигу сезона на более ранние сроки. В соответствии с данными (Трошко и др., 2022), исключающими влияние сдвига сезона путем нормировки оценки состояния озимых культур на накопленную температуру, развитие посевов в течение весенних периодов 2020 и 2021 гг. на территории Южного федерального округа было сопоставимым с состоянием в 2017 г. Данные Росстата (Федеральной службы государственной статистики (https://www.fedstat.ru/) показывают, что в 2017 и 2021 гг. урожаи озимых культур были рекордными. Прогноз урожайности озимых культур на 2021 г., составленный (Трошко и др., 2021), также предполагал больший урожай, чем в среднем за предшествующие 5 лет. Отсутствие данных о пространственном распределении озимых культур в 2017 г. не позволяет провести сравнение с данными о фактической урожайности, но по данным 2021 г. значение NDVI в весенний период также превышало предыдущие показатели. При этом необходимо учитывать, что существует естественное ограничение при использовании NDVI для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, в связи с чем требуется введение дополнительных параметров, например, качестве семян, физических характеристиках почвы и т.д. (Chen et al., 2012).

Проведена оценка интенсивности вегетации в виде выявления зависимости среднемноголетнего весеннего NDVI от площади полей, занятых озимыми культурами, с учетом севооборотов (рис. 6). На графике отражены как общие средние значения за рассматриваемый период, так и средние значения для трех наиболее распространенных родов почв, при этом учитывались поля с площадью более 20 га, т.к. на значение пикселя MODIS для поля меньшего размера могут оказывать влияние различные шумы (Pan, 2021).



Рис. 6. Зависимость значений NDVI от размера поля (a – средний NDVI озимых на светло-каштановых глубоких почвах, δ – средний NDVI озимых на темно-каштановых глубоких почвах, e – средний NDVI озимых на каштановых глубоких почвах, e – средний NDVI озимых).

На графике показано снижение среднего значения NDVI как для общего среднего значения индекса, так и для всех рассмотренных типов почв. Снижение значений NDVI на полях площадью до 30 га может объясняться погрешностями при расчетах с использованием данных спутниковой съемки низкого пространственного разрешения. Полям с площадями до 150–200 га (более

Таблица 3.	Распределение:	полей и среднего	NDVI по типам почв
------------	----------------	------------------	---------------------------

№ п/п	Тип почв	Площадь полей, тыс. га	Средняя площадь поля, га	Средний NDVI
1	Светло-каштановые	13.5	64.4	0.5
2	Светло-каштановые глубокие	63.2	90.3	0.49
3	Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые	29.7	77.3	0.51
4	Светло-каштановые солонцеватые и солончаковатые и солонцы	27.9	108.8	0.47
5	Каштановые солонцеватые и солончаковатые	34.2	157.1	0.48
6	Каштановые глубокие	135.9	126.5	0.49
7	Темно-каштановые глубокие	131.9	120.5	0.51
8	Луговые	16.2	74.7	0.54
9	Пески	13.2	86.1	0.5
10	Пойменные засоленные	6.4	44.3	0.51
11	Солончаки типичные и солонцы луговые	14.2	63.2	0.49
12	Солонцы луговые	0.6	286.1	0.27
13	Солончаки луговые	1.3	70.6	0.46

80% от общего количества полей) соответствуют как минимальные, так и максимальные значения NDVI, что объясняется распространением таких полей по всей территории исследования, что означает, что данные поля могут иметь различные условия. При единых почвенных условиях поля такого размера могут располагаться как в западной части зоны исследования, характеризующейся более высокими значениями NDVI при учете различных характеристик полей, так и в восточной части Курского и Нефтекумского муниципальных районов с худшими почвенными условиями и условиями увлажнения. Полученное распределение данных является нелинейным, что подтверждается значениями коэффициента детерминации, лежащих в пределах от 0.06 до 0.15, поэтому для оценки взаимосвязи был использован способ логарифмической регрессии, отражающий значительное сокращение интервала (выход на плато) значений NDVI на полях с плошалью более 400 га. По распределению максимальных значений NDVI можно сделать вывод, что оптимальным диапазоном размеров полей для выращивания озимых культур на востоке Ставропольского края является площадь до 150 га. На каштановых глубоких почвах высокие значения NDVI фиксируются на полях площадью до 270 га, на темнокаштановых глубоких и светло-каштановых глубоких – на полях площадью до 120 га. Но показанный на графиках значительный разброс значений NDVI для полей с такими площадями показывает

необходимость учета различных характеристик (почв, увлажнения и т.д.) при планировании севооборотов озимых культур. При этом во всех рассмотренных случаях NDVI на полях с площадью более 500 га не опускался ниже 0.5, то есть, оставался выше среднемноголетнего значения (0.49).

Для определения связи между типом почв и состоянием озимых культур подсчитано распределение полей, занятых озимыми культурами, по типам почв и усредненные значения весеннего NDVI за 2011—2021 гг. (табл. 3). Площади полей, относящихся к различным родам почв, указаны по состоянию на 2021 г., т.к. они меняются каждый год в связи с севооборотом. Значение NDVI указано как среднемноголетнее.

Самым распространенным родом почв среди полей, занятых озимыми, в зоне исследования являются каштановые глубокие почвы (136 тыс. га в 2021 г., 27.7% от общей площади полей с озимыми). Наименьшее распространение получили солонцы луговые.

Наибольшее значение NDVI имеют поля, расположенные на луговых почвах (0.54). Данный тип почв имеет небольшое распространение в зоне исследования — вдоль русла р. Кура на территории Курского муниципального района. Худший показатель NDVI имеют поля с озимыми культурами, расположенные на солонцах луговых (0.27) и солончаках луговых (0.46). Данные типы почв распространены на территории Левокум-

ДОРОШЕНКО

Экспозиция	Площадь полей, тыс. га	Средняя площадь поля, га	Средний NDVI
45°–90° BCB	1.1	96.2	0.46
90°-135° ВЮВ	13.7	104.1	0.47
135°-180° ЮЮВ	206.8	107.1	0.49
180°-225° ЮЮЗ	258.3	101.8	0.50
225°-270° ЗЮЗ	7.9	98.7	0.47
270°–315° 3C3	0.05	23.4	0.49

	Таблица 4.	Распределение	полей и среднего) NDVI по	экспозиции склоно
--	------------	---------------	------------------	-----------	-------------------

ского и Нефтекумского муниципальных районов. Также должен учитываться средний размер поля, заметно влияющий на значение NDVI, как, например, на солонцах луговых, где сочетаются как неблагоприятные почвенные условия, так и укрупненные размеры полей. При этом выборка полей, расположенных на солонцах луговых, ограничена всего двумя объектами, поэтому их можно исключить из анализа.

Для большинства типов почв отклонение в большую или меньшую сторону от среднемноголетнего весеннего значения NDVI (0.49) не превышает 10%. Наибольшее отклонение в меньшую сторону — значения для полей на солонцах луговых (44.9%).

Для выявления соответствия между экспозицией полей и интенсивностью вегетации озимых культур подсчитано количество полей, занятых озимыми культурами, в соответствии с распределением полей по 8 румбам для большей наглядности и более четкого распределения полей (табл. 4). Как и в табл. 3, площади полей с различной экспозицией представлены по состоянию на 2021 г. для устранения влияния севооборотов.

Преобладают поля с южной экспозицией $(135^{\circ}-225^{\circ})$, они составляют почти 90% от общей площади полей и имеют самые высокие показатели NDVI за весенний период. Поля с северной экспозицией $(315^{\circ}-345^{\circ})$ в зоне исследования отсутствуют, а также наименьшим количеством объектов представлены объекты с экспозицией западо-северо-запад $(270^{\circ}-315^{\circ})$, что связано с общим юго-восточным уклоном поверхности Терско-Кумской низменности. В связи с недостаточным объемом выборки высокие показатели NDVI для полей с западо-северо-западной экспозицией, располагающихся вдоль русла р. Кура и вблизи крупных оврагов, рассматривать в сравнении не имеет смысла.

Несмотря на проявившуюся закономерность между значением NDVI и экспозицией, при пре-

обладающей крутизне поверхности до 2° нецелесообразно считать ориентацию склонов фактором, значительно влияющим на произрастание озимых культур.

Наименьшую среднюю площадь при наибольших средних значениях NDVI показывают поля, располагающиеся на пойменных засоленных почвах и на крутых склонах, т.е. вдоль русла р. Кума. В этой области конфигурация полей значительно зависит от рельефа местности.

Отклонение от среднемноголетнего весеннего значения NDVI (0.49) для всех румбов находится в пределах 10%. Совпадение среднего значения NDVI для полей с западо-северо-западной экспозицией со среднемноголетним значением учитывать не следует в связи с недостаточностью выборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работ по картографированию границ полей на востоке Ставропольского края получена векторная маска пахотных земель по состоянию на 2021 г. Полученные данные о распределении озимых культур, вегетации и морфометрических характеристиках для каждого поля за 10 лет (2011-2021 гг.) позволили выявить взаимосвязь между состоянием озимых культур на различных родах почв и экспозицией склонов. Несмотря на малые уклоны поверхности преобладающего количества полей, на полях с южной экспозицией среднемноголетний весенний NDVI озимых культур выше на большинстве типов почв. При этом такое влияние может считаться незначительным. Выявлено, что повышение среднемноголетних сумм осадков приводит к повышению среднего весеннего NDVI озимых культур, в среднем, на 0.01. Наиболее оптимальными для выращивания озимых культур полями на различных родах почв являются поля площадью до 150 га.

Полученные взаимосвязи могут быть использованы при планировании севооборотов и оценке эффективности существующих посевов. Использованная методика требует проверки в других агроклиматических условиях, в том числе, с большим разнообразием крутизны и экспозиции уклонов, а также на других видах культур.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФНЦ агроэкологии РАН НИР № 122020100311-3, НИР № 122020100405-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антонов С.А. Изменение агроклиматического районирования территории Ставропольского края для повышения продуктивности агроландшафтов // Изв. Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 3(71). С. 8–11.

https://doi.org/10.25930/0erb-cm88 EDN XRTQZV.

Берденгалиева А.Н., Берденгалиев Р.Н. Связь сезонной динамики озимой пшеницы и рельефа в подзоне южных черноземов Волгоградской области // Научно-агрономический журн. 2022. № 3(118). С. 49–56. https://doi.org/10.34736/FNC.2022.118.3.007.49-56 EDN WLPXJN.

Денисов П.В., Середа И.И., Трошко К.А. и др. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.

EDN CVLTGO.

Денисова Е.В. Применение современных технологий при инвентаризации земель // Научно-агрономический журн. 2020. № 1(108). С. 10–14.

https://doi.org/10.34736/FNC.2020.108.1.002.10-14 EDN JIFEOC.

Денисова Е.В. К вопросу учета орошаемых угодий Волгоградской области с применением методов дистанционного мониторинга // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11. № 1. С. 113–128. https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-1-113-128. EDN TNVYAH.

Зинченко В.Е., Лохманова О.И., Калиниченко В.П. и др. Космический мониторинг земель сельскохозяйственного назначения юга России // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 3. С. 33.

https://doi.org/10.7868/S0205961413030068.EDN QAXMFN.

Комаров А.А., Ирмулатов Б.Р., Якушев В.В. и др. Использование данных дистанционного зондирования для управления продуктивностью пшеницы в условиях аридной зоны (на примере Северного Казахстана) // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2021 года. Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН. 2021. С. 51–55. EDN WCI-JTY.

Лупян Е.А., Середа И.И., Денисов П.В. и др. Дистанционный мониторинг состояния озимых культур зимой 2020–2021гг. на Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 165–172. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-165-172

EDN MFAITF.

Письменная Е.В., Азарова М.Ю. Зависимость продуктивности озимой пшеницы от показателей NDVI в засушливой зоне Ставропольского края // Агропромышленные технологии Центральной России. 2021. № 1(19). С. 39–45

https://doi.org/10.24888/2541-7835-2021-19-39-45. EDN CCUPAK.

Середа И.И., Денисов П.В., Трошко К.А. и др. Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на европейской территории России в октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 304–310. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310

EDN AWYDOO.

Синельникова К.П. Пространственный анализ деградации агроландшафтов Донской гряды // Научно-агрономический журн. 2021. № 4(115). С. 30–34. https://doi.org/10.34736/FNC.2021.115.4.005 EDN WAHUTS.

Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12–15. EDN RCQQIN.

Тесленок К.С., Муштайкин А.П., Тесленок С.А. Изучение особенностей сельскохозяйственных угодий с использованием цифровых моделей рельефа // Интер-Карто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 3. С. 221–228.

Трошко К.А., Денисов П.В., Лупян Е.А. и др. Особенности состояния зерновых культур в регионах европейской части России и Сибири в июне 2021 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 325–331.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331. EDN KJNBSF.

Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А. и др. Особенности развития озимых сельскохозяйственных культур на юге европейской части России весной 2022 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 261–267.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-261-267. EDN BJXOUW.

Филина Я.А., Дунаева Е.А., Денисов П.В. Оценка состояния озимых зерновых культур по Республике Крым с помощью сервиса ВЕГА // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы IX Международной научной конференции, Красноярск, 13–16 сентября 2022 года. Красноярск: Сибирский федеральный университет. 2022. С. 307–310. EDN RAINYE. Шинкаренко С.С., Бодрова В.Н., Сидорова Н.В. Влияние экспозиции склонов на сезонную динамику вегетационного индекса NDVI посевных площадей // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1(53). С. 96–105.

https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-12. EDN RPZVDY.

Юферев В.Г., Мелихова А.В., Балынова В.В. Геоинформационный анализ рельефа Кумо-Манычской впадины // Природные системы и ресурсы. 2022. Т. 12. № 2. С. 67–76.

https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.2.9 EDN TDGQVF.

Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель: ACT. 2011. 632 с.

Chen Q., Laurin G.V., Battles J.J., Saah D. Integration of airborne lidar and vegetation types derived from aerial photography for mapping aboveground live biomass // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 121. P. 108–117.

Franch B., Vermote E., Becker-Reshef I., Claverie M., Huang J., Zhang J., Justice C., Sobrino J. Improving the timeliness of winter wheat production forecast in the United States of America, Ukraine and China using MODIS data and NCAR Growing Degree Day information // Remote Sensing of Environment. 2015. № 161.

https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.014

Pan L., Xia H., Zhao X., Guo Y., Qin Y. Mapping Winter Crops Using a Phenology Algorithm, Time-Series Sentinel-2 and Landsat-7/8 Images, and Google Earth Engine // Remote Sens. 2021. V. 13. № 2510.

https://doi.org/10.3390/rs13132510

Dependence of the Vegetation of Winter Crops on the Relief and Soils in the East of the Stavropol Region

V. V. Doroshenko

Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences" (FSC of Agroecology of the RAS), Volgograd, Russia

In total, 7.444 fields with a total area of 857.9 thousand hectares were mapped on the territory of five eastern arid regions of the Stavropol Territory. As of 2021, arable land occupies more than 55% of the study area and is located mainly in its western part. Winter crops occupy 4.693 fields with a total area of more than 487 thousand hectares (56.9% of the total field area). Mapping of the contours of the fields was carried out on the basis of satellite images "Sentinel-2" ("natural colors"). The morphometric characteristics of the fields were calculated on the basis of the SRTM3 DEM. Mask of winter crops for the period 2011–2021 and weekly composites with data on the NDVI value for spring (March–May) were obtained using the Vega-Science service. The areas of the fields identified according to remote sensing data are comparable with official statistics. The fields are located on lands with a steepness of up to 5°, the steepness of 1°–2° prevails (about 90% of the total area). Most fields have a predominant southern exposure, there are no fields with a northern exposure. There are 13 kinds of soils on the territory of the study area, chestnut deep soils predominate. Average NDVI for March–May 2011–2021 It shows the highest values in fields located on meadow soils, the lowest NDVI values are observed on salt flats and salt marshes. It was revealed that the NDVI value decreases with increasing field size, the optimal field size is up to 150 hectares. The highest NDVI values were found in fields with a steepness of 1°–2°, southern exposure and meadow, chestnut and light chestnut soils. The influence of annual precipitation amounts on the NDVI value is analyzed.

Keywords: Stavropol region, morphometric analysis, geoinformation analysis, remote sensing data, winter crops

REFERERENCES

Antonov S.A. Izmenenie agroklimaticheskogo rajonirovaniya territorii Stavropol'skogo kraya dlya povysheniya produktivnosti agrolandshaftov [Changing the agro-climatic zoning of the Stavropol Territory to increase the productivity of agricultural landscapes] // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018. Nº 3(71). P. 8–11. (In Russian).

https://doi.org/10.25930/0erb-cm88 EDN XRTQZV.

Berdengalieva A.N., Berdengaliev R.N. Svyaz' sezonnoj dinamiki ozimoj pshenicy i rel'efa v podzone yuzhnyh chernozemov Volgogradskoj oblasti [The relationship of seasonal dynamics of winter wheat and relief in the subzone of southern chernozems of the Volgograd region] // Nauchno-agronomicheskij zhurnal. 2022. № 3(118). P. 49–56. (In Russian).

https://doi.org/10.34736/FNC.2022.118.3.007.49-56 EDN WLPXJN.

Chen Q., Laurin G.V., Battles J.J., Saah D. Integration of airborne lidar and vegetation types derived from aerial photography for mapping aboveground live biomass // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 121. P. 108–117.

Denisov P.V., Sereda I.I., Troshko K.A. i dr. Vozmozhnosti i opyt operativnogo distancionnogo monitoringa sostoyaniya ozimyh kul'tur na territorii Rossii [Opportunities and experience of operational remote monitoring of the state of winter crops in Russia] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. T. 18. N 2. P. 171–185. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185 EDN CVLTGO. *Denisova E.V.* Primenenie sovremennyh tekhnologij pri inventarizacii zemel' [Application of modern technologies in land inventory'] // Nauchno-agronomicheskij zhurnal. 2020. № 1(108). P. 10–14. (In Russian).

https://doi.org/10.34736/FNC.2020.108.1.002.10-14 EDN JIFEOC.

Denisova E.V. K voprosu ucheta oroshaemyh ugodij Volgogradskoj oblasti s primeneniem metodov distancionnogo monitoringa [On the issue of accounting for irrigated lands of the Volgograd region using remote monitoring methods] // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2021. T. 11. № 1. P. 113–128. (In Russian).

https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-1-113-128 EDN TNVYAH.

Filina Ya.A., Dunaeva E.A., Denisov P.V. Ocenka sostoyaniya ozimyh zernovyh kul'tur po Respublike Krym s pomoshch'yu servisa VEGA [Assessment of the state of winter grain crops in the Republic of Crimea using the VEGA service] // Regional'nye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli: Proc. 9th International Scientific Conference, September 13–16, 2022. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. 2022. P. 307–310. EDN RAINYE. (In Russian).

Franch B., Vermote E., Becker-Reshef I., Claverie M., Huang J., Zhang J., Justice C., Sobrino J. Improving the timeliness of winter wheat production forecast in the United States of America, Ukraine and China using MODIS data and NCAR Growing Degree Day information // Remote Sensing of Environment. 2015. № 161.

https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.014

Komarov A.A. Irmulatov B.R., YAkushev V.V. i dr. Ispol'zovanie dannyh distancionnogo zondirovaniya dlya upravleniya produktivnost'yu pshenicy v usloviyah aridnoj zony (na primere Severnogo Kazahstana) [Using remote sensing data to control wheat productivity in arid zone conditions (on the example of Northern Kazakhstan)] // Primenenie sredstv distancionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom hozyajstve : Proc. 3th All-Russian Scientific Conference with international participation, September 16–17, 2021. St. Petersburg: Agrophysical Research Institute RASKHN. 2021. P. 51–55. EDN WCIJTY. (In Russian).

Lupyan E.A., Sereda I.I., Denisov P.V. i dr. Distancionnyj monitoring sostoyaniya ozimyh kul'tur zimoj 2020-2021gg. na Evropejskoj territorii Rossii [Remote monitoring of winter crops in winter 2020-2021 on the European territory of Russia] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. № 1. P. 165–172. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-165-172 EDN MFAITF.

Pan L., Xia H., Zhao X., Guo Y., Qin Y. Mapping Winter Crops Using a Phenology Algorithm, Time-Series Sentinel-2 and Landsat-7/8 Images, and Google Earth Engine // Remote Sens. 2021. V. 13. № 2510.

https://doi.org/10.3390/rs13132510

Pis'mennaya E.V., Azarova M.Yu. Zavisimost' produktivnosti ozimoj pshenicy ot pokazatelej NDVI v zasushlivoj zone Stavropol'skogo kraya [Dependence of winter wheat productivity on NDVI indicators in the arid zone of the Stavropol Territory] // Agropromyshlennye tekhnologii Central'noj Rossii. 2021. № 1(19). P. 39–45. (In Russian). https://doi.org/10.24888/2541-7835-2021-19-39-45 EDN CCUPAK.

Sereda I.I., Denisov P.V., Troshko K.A. i dr. Unikal'nye usloviya razvitiya ozimyh kul'tur, nablyudaemye po dannym sputnikovogo monitoringa na evropejskoj territorii Rossii v oktyabre 2020 g [Unique conditions for the development of winter crops observed according to satellite monitoring data on the European territory of Russia in October 2020] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. № 5. P. 304–310. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310 EDN AWYDOQ.

Shinkarenko S.S., Bodrova V.N., Sidorova N.V. Vliyanie ekspozicii sklonov na sezonnuyu dinamiku vegetacionnogo indeksa NDVI posevnyh ploshchadej [The influence of slope exposure on the seasonal dynamics of the vegetation index NDVI of acreage] // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2019. № 1(53). P. 96–105. (In Russian). https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-12 EDN RPZ-VDY.

Sinel'nikova K.P. Prostranstvennyj analiz degradacii agrolandshaftov Donskoj gryady [Spatial analysis of degradation of agricultural landscapes of the Don ridge] // Nauchnoagronomicheskij zhurnal. 2021. № 4(115). P. 30–34. (In Russian).

https://doi.org/10.34736/FNC.2021.115.4.005 EDN WAHUTS.

Storchak I.G., Eroshenko F.V. Ispol'zovanie NDVI dlya ocenki produktivnosti ozimoj pshenicy v Stavropol'skom krae [The use of NDVI to assess the productivity of winter wheat in the Stavropol Territory] // Zemledelie. 2014. \mathbb{N}_{2} 7. P. 12–15. EDN RCQQIN. (In Russian).

Teslenok K.S., Mushtajkin A.P., Teslenok S.A. Izuchenie osobennostej sel'skohozyajstvennyh ugodij s ispol'zovaniem cifrovyh modelej rel'efa [Study of agricultural land features using digital terrain models] // InterKarto. InterGIS. 2020. V. 26. № 3. P. 221–228. (In Russian).

Troshko K.A., Denisov P.V., Lupyan E.A. i dr. Osobennosti sostoyaniya zernovyh kul'tur v regionah evropejskoj chasti Rossii i Sibiri v iyune 2021 g. po dannym distancionnogo monitoringa [Features of the state of grain crops in the regions of the European part of Russia and Siberia in June 2021 according to remote monitoring data] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. T. 18. № 3. C. 325–331. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331 EDN KJNBSF.

Troshko K.A., Denisov P.V., Dunaeva E.A. i dr. Osobennosti razvitiya ozimyh sel'skohozyajstvennyh kul'tur na yuge evropejskoj chasti Rossii vesnoj 2022 g. po dannym distancionnogo monitoringa [Features of the development of winter crops in the south of the European part of Russia in the spring of 2022 according to remote monitoring data] // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 2. P. 261–267. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-261-267 EDN BJXOUW.

Yuferev V.G., Melihova A.V., Balynova V.V. Geoinformacionnyj analiz rel'efa Kumo-Manychskoj vpadiny [Geoinformation analysis of the relief of the Kumo-Manych depression] // Prirodnye sistemy i resursy. 2022. V. 12. № 2. P. 67–76. (In Russian).

https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.2.9 EDN TDGQVF.

National Atlas of Soils of the Russian Federation [National Atlas of Soils of the Russian Federation]. M.: Astrel': ACT. 2011. 632 p. (In Russian).

Zinchenko V.E., Lohmanova O.I., Kalinichenko V.P. i dr. Kosmicheskij monitoring zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya yuga Rossii [Space monitoring of agricultural lands in the South of Russia] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2013. № 3. P. 33. (In Russian). https://doi.org/10.7868/S0205961413030068 EDN QAXMFN.

____ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ __ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ ____

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПАХОТНЫХ ЗЕМЕЛЬ В АГРОЛАНДШАФТАХ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2023 г. К. П. Синельникова^{*a*, *}, А. Н. Берденгалиева^{*a*}, Ш. Матвеев^{*a*}, В. В. Балынова^{*a*}, А. В. Мелихова^{*a*}

^аФедеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук" (ФНЦ агроэкологии РАН), Волгоград, Россия

**E-mail: sinelnikova-k@vfanc.ru* Поступила в редакцию 27.01.2023 г.

В настоящее время все большее внимание уделяется развитию технологий спутникового мониторинга землепользования и состояния агроландшафтов. Отсутствие актуальных сведений о границах отдельных сельскохозяйственных полей не позволяет в полной мере оценить состояние пахотных земель и произвести их учет. Доступные статистические источники имеют расхождения и не обладают сведениями о пространственном распределении используемых и неиспользуемых сельскохозяйственных полей. Целью данной работы является установление пространственного размещения обрабатываемых и не обрабатываемых пахотных земель Волгоградской области по данным дистанционного зондирования. В работе представлены результаты картографирования актуальных границ пахотных земель Волгоградской области по состоянию на 2021 г. При дешифрировании пахотных угодий были использованы данные высокого разрешения Sentinel-2 и Google Earth PRO в геоинформационной программе QGIS3. В результате картографировано 6.05 млн га пахотных земель. Проведено сравнение полученных данных с данными официальной статистики на 2021 г., в результате которого, отмечено превышение на 12% в сравнении с результатами дешифрирования. Отмечается, что за последние 20 лет по статистическим данным площади пашни и залежей практически не меняются. При сравнении результатов дешифрирования с данными о пахотных землях сервиса "Вега" отмечена разница в 4%, что является достаточно высокой точностью. Согласно Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 г. площадь используемой пашни превышена на 8%. По данным цифровой модели местности SRTM вычислены морфометрические параметры пашни на всей территории региона. Определено, что сельскохозяйственные поля находятся преимущественно на склонах западной экспозиции (37%), что обусловлено преобладанием общего уклона рельефа к западу. Большая часть (78%) площадей полей находятся на склонах крутизной до 1°, а около 2% занимают площади более 3°. На крутых склонах отмечается водная эрозия. Наиболее ровный рельеф в Заволжье на территории Прикаспийской низменности. С использованием дистанционных методов проведена оценка площадей залежных земель: около 960 тыс. га. По различным источникам отмечается от 4.8 до 891 тыс. га неиспользуемой пашни. Полученная геоинформационная основа позволит в полной мере провести учет и оценить состояние обрабатываемых и не обрабатываемых пахотных земель, а также разработать проекты рационального использования земельных ресурсов для повышения урожайности и препятствия деградации агроландшафтов.

Ключевые слова: агроландшафт, пахотные земли, ГИС-технологии, морфометрический анализ, дистанционное зондирование, Волгоградская область **DOI:** 10.31857/S0205961423050081, **EDN:** XDHIHT

введение

Сельскохозяйственное использование земельных ресурсов без учета ландшафтной составляющей ведет к их деградации (эрозии, дефляции, снижению плодородия). Рациональное использование земель возможно только при наличии точных данных о них, дающих возможность проводить оперативную оценку состояния агроландшафтов и соответствующее управление сельскохозяйственным производством. Для повышения экономической эффективности растениеводства в зоне недостаточного атмосферного увлажнения большое значение имеет знание пространственного распределения сельхозугодий в ландшафте, дающее возможность определения различных характеристик рельефа, почвенного покрова, гидротермических условий. Одним из таких регионов зоны рискованного земледелия является Волгоградская область.

В связи с этим возникает необходимость разработки актуальной базы данных пахотных земель, включающей данные о продолжительности использования, что в сочетании с данными о посевных культурах может применяться для определения севооборотов, предотвращения деградации почв и своевременного принятия мер против деградации агроландшафтов. Данные официальной статистики как правило учитывают только общие площади земель различных категорий, но не характеризуют их актуальное пространственное распределение. Также необходим оперативный контроль использования земель для своевременного принятия решений как собственниками по корректировке агротехнических приемов, так и контролирующими органами власти. Кроме этого, необходим тщательный учет и включение в базу данных залежных земель, что определяется возможностью их включения в сельскохозяйственное производство (Рулев и др., 2018; Rulev, Pugacheva, 2017).

В современных исследованиях структуры землепользования все чаще используются технологии дистанционного зондирования Земли из космоса и геоинформационные технологии (Васильченко, 2022; Мелихова, 2022, Горохова и др., 2017). Тем не менее, в Волгоградской области ранее анализировалось землепользование дистанционными методами на уровне отдельных сельскохозяйственных полей только по отдельным районам или хозяйствам, а для всего региона такой работы не проводилось (Матвеев, 2022; Синельникова, 2020; Денисова; 2022). Существующие способы автоматизированного дешифрирования, как правило, используют эталоны, рассчитанные на иные климатические и почвенные условия, а также материалы дистанционного зондирования низкого разрешения, что отражается на качестве получаемых данных, поскольку производится попиксельный анализ (Барталев и др., 2011), из-за чего отдельные поля объединяются в группы пикселей. Визуальное дешифрирование сопряжено с высокими трудозатратами, но обеспечивает наибольшую точность картографирования сельхозугодий. Особенно это касается определения неиспользуемых в течение длительного времени пахотных угодий.

Целью данного исследования является определение пространственного размещения обрабатываемых и не обрабатываемых пахотных земель по данным дистанционного зондирования на территории Волгоградской области.

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования выступают два вида сельскохозяйственных угодий: пашни и залежи на территории Волгоградской области. По данным Государственного доклада о состоянии земель на 1 января 2022 г. в Волгоградской области пахотные земли составляют более 52% от общей площади региона. Природные условия области являются благоприятными для сельского хозяйства, в частности, растениеводства за счет достаточно высоких среднегодовых температур, при этом существует высокий контраст между погодными условиями летнего и зимнего периодов. Ограничивающим фактором для растениеводства является относительно небольшое количество осадков в южных и восточных районах. Доминирующими сельскохозяйственными культурами являются пшеница и подсолнечник. Преимущественно применяется система сухого земледелия, что не позволяет получить максимальных объемов с посевных площадей (Rulev, Pugacheva, 2019). С 2014 г. общая посевная площадь в регионе по данным официальной статистики увеличилась на 5%. Почвенно-климатический потенциал территории позволяет получать высокие урожаи, но особенности территории влияют на продуктивность культур, т.к. область имеет большую протяженность и располагается в двух природных зонах степной и полупустынной (Rulev, Pugacheva, 2019: Кравченко и др., 1995: Эдельгериев, 2021).

Для картографирования границ полей использовалась мозаика из безоблачных спутниковых снимков Sentinel-2 на 2021 г. и спутниковые данные сверхвысокого пространственного разрешения (~1 м/пиксель) Google Earth PRO. Был проведен подбор и предварительная обработка снимков Sentinel-2, включающая составление композитов с включением инфракрасного диапазона. Территория Волгоградской области охватывается 22 тайлами Sentinel-2. Использовались снимки весеннего и осеннего сезона для разделения обрабатываемых или необрабатываемых земель, поскольку одномоментные снимки не обеспечивают достаточную точность (Терехин, 2015). Уточнение используемости пахотных земель проводилось также по данным Landsat за 1984-2020 гг. На рис. 1 показан пример картографирования (в комбинации каналов искусственные цвета с включением ближних инфракрасных каналов NIR и SWIR) залежных земель в окрестностях озера Эльтон в Палласовском районе Волгоградской области, где к 2021 г. практически не осталось используемой пашни.

Картографирование границ полей и их последующий анализ производились в геоинформационной среде QGIS 3.26. При создании картосхем использовалась система координат WGS-84. Площади вычислялись на эллипсоиде WGS-84



Рис. 1. Картографирование пахотных земель по спутниковым снимкам (Палласовский район, окрестности озера Эльтон).

(EPSG:7030). Морфометрический анализ проведен по цифровой модели рельефа SRTM3, которая была перепроецирована в проекцию UTM, после чего рассчитаны крутизна и экспозиция. Каждому полю присвоен атрибут преобладающих по площади в его границах экспозиции и крутизны, что можно считать характеристикой склона, на которых расположены поля (Шинкаренко и др., 2019).

Поскольку площадь полигонов рассчитывалась на эллипсоиде, то может быть также неточность, вызванная влиянием рельефа — крутизной склонов, которое не учитывается при расчетах в плановых координатах или на эллипсоиде. Так как крутизна сельскохозяйственных полей в большинстве случаев не превышает $2^{\circ}-3^{\circ}$ (Belyakov, 2021), то возможная ошибка, вызванная этим фактором, составляет не более 0.1%. В работе рассматривались сельскохозяйственные поля площадью от 1 га. Разделение на пахотные и залежные земли проводилось экспертным методом визуальным дешифрированием.

Для оценки результатов дешифрирования спутниковых снимков использовались офици-

вания других авторов (Воробьев, 2014; Краснощеков, 2015; Rulev, Pugacheva, 2017; Belyakov, 2021). Также для сравнения с полученными результатами применялись электронные растровые карты обрабатываемых земель за 2016—2021 гг. по данным сервиса Вега (Лупян, 2015; Loupian 2022). Данные основаны на использовании многолетних рядов спутниковых данных сканера MODIS с космических аппаратов Тегга и Aqua с пространственным разрешением 250 м/пиксель. В основе этих данных лежит автоматизированный алгоритм распознавания спектральных характеристик пахотных земель с достаточно высокой точностью (Барталев и др., 2011).

альные статистические данные (Итоги Всерос.

сельск. переписи, 2018; Захарова, 2022) и исследо-

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполненного дешифрирования спутниковых снимков и геоинформационного анализа установлено пространственное размещение более 68 тыс. сельскохозяйственных полей в Волгоградской области, в том числе проведено



Рис. 2. Распределение используемых и неиспользуемых пахотных земель по районам.

разделение на используемые (более 55 тыс. объектов) и неиспользуемые (более 12 тыс.). Общая площадь пахотных земель составила 6.05 млн га, из них используемые — 5.09 млн га, неиспользуемые — 0.96 млн га. С учетом возможной ошибки выделения границ по данным сверхвысокого разрешения, соответствующей линейному размеру пикселя данных Google Earth (примерно 1 м), и влиянием рельефа погрешность определения площади составляет не более 30 тыс. га. или 0.05% площади.

Также полученные данные были сгруппированы по границам муниципальных районов, в результате наибольшие площади пахотных земель отмечены в Октябрьском, Михайловском, Новоаннинском районах. Максимальные площади залежных земель размещены в Заволжье, лидером является Палласовский район (289.9 тыс. га). На правобережье Волги лидирует Городищенский район, где 50.6 тыс. га составляют залежи (рис. 2). Как правило, большая часть неиспользуемой пашни в регионе приурочена к малопродуктивным засоленным почвам (Денисова, 2021, 2022).

По данным Росстата на 1995 г. в регионе было 5.84 млн га пашни, в том числе 3.99 млн га посевной площади. Залежи значительно реже приводятся в официальной статистике по сравнению с другими типами сельскохозяйственных угодий, поэтому сравнительный анализ статистических данных с результатами дешифрирования зачастую затруднен. По данным (Rulev, Pugacheva, 2019) в 1995 г. в Волгоградской области было 0.64 млн га залежных земель. Таким образом, общая площадь используемых и неиспользуемых пахотных угодий по их данным составляла 6.47 млн га. На 2006 г. Росстат приводит 5.85 млн га обрабатываемой пашни и всего 4.88 тыс. га – необрабатываемой. Также данные по площадям пашни и залежей на 2005 год представлены в Атласе почв (2011), но они полностью повторяют данные Росстата. В то же время по данным Всероссийской сельскохозяйственной переписи в 2006 г. в Волгоградской области зарегистрировано только

4.74 млн га используемой пашни и 0.5 млн га залежей. По данным А.В. Воробьева в 2010 г. в регионе было 5.8 млн га пахотных земель и 4.8 тыс. га неиспользуемых (Воробьев, 2014). На 2015 г. Краснощеков приводит данные о 5.18 млн га обрабатываемой пашни и 0.29 млн га – необрабатываемой (Краснощеков, 2015). В 2017 г. по данным (Rulev, Pugacheva, 2019) в регионе зафиксировано 5.63 млн га пашни и 1.68 млн га залежей, т.е. суммарно 7.32 млн га пахотных земель, в то время как по данным переписи 2016 г. приводится 5.38 млн га пахотных земель, в том числе 4.75 млн га используемых и 0.63 млн га неиспользуемых. В Государственном докладе о состоянии земель Российской Федерации на 1 января 2022 г. (Захарова, 2022) указано 5.85 млн га обрабатываемой пашни и 4.7 тыс. га залежей. На рис. 3 показана доля пашни в муниципальных районах Волгоградской области по разным данным. Отмечаются большие расхождения в Палласовком районе.

Таким образом можно сделать вывод, что официальные статистические данные и результаты проведенных исследований имеют существенные расхождения, при этом площадь залежных земель по данным Росстата существенно занижена в сравнении с данными сельскохозяйственных переписей и независимых оценок. Согласно (Belvakov, 2021) в регионе на 2021 г. расположено примерно 5.6-6.1 млн га обрабатываемой пашни и 0.89 млн га залежей (6.5-7 млн га совокупной площади обоих видов угодий). Это наиболее близкая оценка к полученным в данном исследовании результатам на основе дешифрирования спутниковых данных. При этом площадь используемых земель по всем оценкам кроме переписей представляется несколько завышенной. Поэтому в дальнейших исследованиях требуется сравнительный анализ с результатами других исследований, в основе которых лежат данные дистанционного зондирования Земли из космоса и современные геоинформационные методы.

Фрагмент электронных карт на основе визуального дешифрирования и данных автоматизированного распознавания обрабатываемой пашни сервиса "Вега" представлен на рис. 4. Общая площадь используемой пашни в Волгоградской области согласно этому сервису составляет 4.89 млн га, что всего на 4% меньше величины, полученной на основе дешифрирования спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения (5.09 млн га).

Таким образом, наиболее близкие к результатам обработки данных дистанционного зондирования Земли оценки площади обрабатываемых земель приводятся в данных сельскохозяйственных переписей 2006 и 2016 гг. — 4.75 млн. При этом разница в величине используемой пашни в 2006 и 2016 гг. составляет всего 1.9 тыс. га, в то время как площадь залежных земель увеличилась на 130 тыс. га: с 0.5 до 0.63 млн га.

Как отмечается в работах (Rulev, Pugacheva, 2019; Барталёв и др., 2011), не ведется подробная статистика залежных земель. Также ошибки при картографировании неиспользуемых сельскохозяйственных земель возникают из-за того, что неточно определено, что же именно относить к этой категории (Денисов и др., 2022). Согласно публичной кадастровой карте большая часть неиспользуемой пашни, в том числе заброшенной в период 80–90-х гг. прошлого века, имеет назначение "для сельскохозяйственного производства" или "для производства сельскохозяйственной продукции". Также старовозрастные залежи практически повсеместно используются для отгонного животноводства (Шинкаренко и др., 2019).

На рис. 5 показаны результаты расчета преобладающих экспозиций и крутизны склонов для каждого поля. В Волгоградской области сельскохозяйственные поля находятся преимущественно на склонах западной экспозиции (37%), что связано с преобладанием общего уклона рельефа к западу. На правом берегу Волги это обусловлено понижением Приволжской возвышенности к Дону от водораздела с Волгой, а на левом берегу – понижением территории Заволжья по направлению на запад к руслу Волги. Практически отсутствуют поля на склонах северной и северо-западной экспозиции. Склоны основных притоков Дона и впадающих в них балок и малых рек имеют преимущественно северо-восточную и юго-западные экспозиции, что связано с ориентацией водотоков. Экспозиция склонов влияет на количество поступающей солнечной энергии, от которой в свою очередь зависит состояние посевов. Отмечено, что на полях южной экспозиции вегетация озимых культур в весенний период начинается раньше (Берденгалиева, Берденгалиев, 2022; Шинкаренко и др., 2019).

Одним из важнейших факторов почвообразования и состояния посевных площадей является рельеф. Водная эрозия на склоновых землях снижает почвенное плодородие, что существенного сказывается на урожайности. Пахотные земли, расположенные на склонах более 3° подвержены деградации из-за эрозионных процессов (Барабанов и др., 2019). Согласно проведенному морфометрическому анализу площади полей, которые находятся на склонах крутизной до 1° составляют 78% (рис. 6), что на 15% превышает данные Юж-НИИгипрозема в этой категории (по данным (Belyakov, 2021)). Крутизну более 3° имеют всего 84.3 тыс. га сельскохозяйственных полей (1.7% от всей площади обрабатываемой пашни). Наиболее ровный рельеф в Заволжье на территории Прикаспийской низменности: Быковский, Ленинский, Николаевский, Палласовский и Среднеахтубин-



Рис. 3. Картограммы доли пахотных земель от общей площади в муниципальных районах Волгоградской области (*a* – результаты дешифрирования; *б* – Сервис "Вега"; *в* – сельскохозяйственная перепись, 2016; *г* – Воробьев, 2010).

ский районы. Здесь основным фактором деградации и ухудшения урожайности является засоление почв как природное, так и вторичное на орошаемых ранее землях без дренажных систем (Денисова, 2021; 2022), в то время как почвы достаточно устойчивы против дефляции (Рулев и др., 2017). Значительное засоление почв и соответственно более низкая урожайность в совокупности с относительно менее благоприятной транспортной доступностью Заволжья объясняют большую долю неиспользуемой пашни (Кулик, 2017; Rulev, Pugacheva, 2019).

Наибольшей долей пашни с крутизной более 3° характеризуется Нехаевский район на крайнем северо-западе Волгоградской области (13.9% площади от всей используемой пашни района). Так-



Рис. 4. Схема распределения земель по данным экспертного дешифрирования (*a*) и данным MODIS сервиса Вега (б).



Рис. 5. Распределение пахотных земель по преобладающей экспозиции (*a*) и преобладающей крутизне склонов (*б*) в Волгоградской области.



Рис. 6. Доля сельскохозяйственных полей с разной крутизной в районах Волгоградской области.

же значительная доля таких сельскохозяйственных полей расположена в Котовском и Камышинском районах (4.5 и 6.1% соответственно), которые находятся на самой возвышенной части водораздела между бассейнами Волги и Дона. Одним из инструментов противоэрозионной организации склоновых земель является агролесомелиорация: создание системы полезащитных, прибалочных и приовражных лесных насаждений (Барабанов и др., 2019; Рулев и др., 2015). Так по данным (Кулик и др., 2017) в Волгоградской области имеется 70.6 тыс. га полезащитных и 35.4 тыс. га противоэрозионных насаждений, но для устойчивого функционирования агроландшафтов требуется еще создать 58.2 и 61.9 тыс. га насаждений каждой категории соответственно. Таким образом, полученные электронные карты крутизны сельскохозяйственных полей позволят оценить их противоэрозионную защищенность лесными насаждениями и разработать при необходимости меры по ее повышению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные дистанционного зондирования позволяют определить пространственное размещение обрабатываемых и необрабатываемых пахотных земель. Полученные для Волгоградской области данные позволили выявить расхождение в площади со статистическими данными. Наиболее схожие результаты получились с данными об обрабатываемых полях сервиса "Вега" и данными Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 г.

Официальные статистические данные структуры земель не дают представление о пространственном охвате, также содержат ряд неточностей по сравнению с результатами обработки данных дистанционного зондирования. Особенно это заметно при определении величины неиспользуемых пахотных земель: по разным источникам эта величина в Волгоградской области составляет от 5 до 900 тыс. га. Согласно результатам дешифрирования, разновременных спутниковых данных Sentinel-2 и Landsat площадь заброшенной пашни на 2021 г. составила 960 тыс. га.

Сформированная база данных содержит атрибутивную информацию о почвенном покрове, характеристиках склонов и в дальнейшем позволит проанализировать влияние этих факторов на состояние посевных площадей и урожайность культур.

Границы полей — это важная составляющая организации точного земледелия. Полученная геоинформационная основа может служить для дальнейшей проработки использования методов точного земледелия и оптимизации сельскохо-зяйственного производства в Волгоградской области.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН № 122020100311-3 "Теоретические основы функционирования и природно-антропогенной трансформации агролесоландшафтных комплексов в переходных природно-географических зонах, закономерности и прогноз их деградации и опустынивания на основе геоинформационных технологий, аэрокосмических методов и математико-картографического моделирования в современных условиях".

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят лаборантов-исследователей лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов ФНЦ агроэкологии РАН Багровского Д.В., Берденгалиева Р.Н. и Гущина В.А. за помощь в картографировании границ полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барабанов А.Т., Фомин С.Д., Кулик А.В., Выпова А.В. К вопросу о стокорегулирующей роли лесомелиоративных и агротехнических противоэрозионных мероприятий // Изв. НВ АУК. 2019. № 3(55). С. 24–35. https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-03-2

Барталёв С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.

Берденгалиева А.Н., Берденгалиев Р.Н. Связь сезонной динамики озимой пшеницы и рельефа в подзоне южных черноземов Волгоградской области // Научно-агрономический журн. 2022. № 3(118). С. 49–56. https://doi.org/10.34736/FNC.2022.118.3.007.49-56

Васильченко А.А. Опыт разработки локальной ГИС орошаемых земель Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области. ИнтерКарто. Интер-ГИС. 2022. Т. 28. Ч. 2. С. 761–772.

https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-2-28-761-772

Воробьев А.В. Земельная реформа в Волгоградской области (Изменения сельскохозяйственного землепользования региона в 1990–2010 гг.). Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2014. 164 с. ISBN 978-5-85536-866-6.

Горохова И.Н., Филиппов Д.В. Применение геоинформационных технологий и материалов космической съемки для мониторинга орошаемых земель Светлоярской оросительной системы (Волгоградская область) // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 79–87. https://doi.org/10.7868/S020596141704008X

Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2021 году / Под ред. Захарова Ж.Ю. М.: Росреестр, 2022. 206 с.

Денисов П.В., Трошко К.А., Полецкая А.Ю., Гогачева Н.А., Ленник А.В., Лупян Е.А., Антошкин А.А., Кашницкий А.В., Кобец Д.А., Плотников Д.Е., Прошин А.А., Толпин В.А. Первые результаты контроля данных сельскохозяйственной микропереписи 2021 г. с использованием средств спутникового мониторинга // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 308–314.

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-6-308-314

Денисова Е.В. Использование ГИС-технологий для создания локальной геоинформационной системы учета орошаемых угодий // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 4. С. 86–96.

https://doi.org/10.31857/S0205961422030046

Денисова Е.В. Оценка эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения с применением ГИС-технологий // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 5. С. 15–24.

https://doi.org/10.31857/S0205961421050031

Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года по Волгоградской области: В 6 т. / Терр. орган Фед. службы гос. статистики по Волгоград. обл. — Волгоград: Волгоградстат. 2018. Т. 3: Земельные ресурсы и их использование. 140 с.

Кравченко Е.И., Мухин Ю.П., Брылев В.А., Харланов В.А., Сажин А.Н., Самборский Ю.П., Анисимов А.А., Иванов И.В., Чурсин Б.П., Воробьев А.В., Маттис Г.Я., Семенютина А.В., Крючков С.Н., Кубанцев Б.С., Чернобай В.Ф., Маркова Е.К., Колякин Н.Н., Рябинина Н.О., Шабунина И.М. Природные условия и ресурсы Волгоградской области. Волгоград : Перемена, 1995. 264 с.

Краснощеков В.Н., Фоменко Ю.П. Оценка влияния хозяйственной деятельности на состояние агроландшафтов Волгоградской области // Природообустройство. 2015. № 2. С. 93–98.

Кулик К.Н., Барабанов А.Т., Манаенков А.С., Кулик А.К. Обоснование прогноза развития защитного лесоразведения в Волгоградской области // Проблемы прогнозирования. 2017. № 6(165). С. 93–100.

Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

Матвеев Ш. Геоинформационное картографирование современного состояния сельскохозяйственных территорий Новоаннинского района Волгоградской области // Природные системы и ресурсы. 2022. Т. 12.

СИНЕЛЬНИКОВА и др.

№ 2. C. 36-42.

https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.2.5

Мелихова А.В. Морфометрический анализ агроландшафтов переходной зоны южных черноземов и темнокаштановых почв Волгоградской области // Природные системы и ресурсы. 2022. Т. 12. № 4. С. 26–33. https://doi.org/https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.4.3

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.

Рулев А.С., Шинкаренко С.С., Бодрова В.Н., Сидорова Н.В. Геоинформационные технологии в обеспечении точного земледелия // Изв. НВ АУК. 2018. № 4(52). С. 115–122.

Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В. Геоинформационное картографирование и моделирование эрозионных ландшафтов. Волгоград: Всероссийский научноисследовательский агролесомелиоративный институт, 2015. 153 с.

Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. Геоморфологические критерии проведения лесомелиорации ландшафтов (на примере Приэльтонья) // Геоморфология. 2017. № 2. С. 63–71.

https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-2-63-71

Синельникова К.П. Геоинформационный анализ современного состояния агроландшафта Донской гряды // Научно-агрономический журн. 2020. № 3(110). С. 9–17. https://doi.org/10.34736/FNC.2020.110.3.002.9-16

Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31. https://doi.org/10.7868/S0205961415010108

Шинкаренко С.С., Бодрова В.Н., Сидорова Н.В. Влияние экспозиции склонов на сезонную динамику вегетационного индекса NDVI посевных площадей // Изв. НВ АУК. 2019а. № 1(53). С. 96–105.

https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-12

Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Солодовников Д.А., Пугачева А.М. Анализ пастбищных ресурсов Волгоградской области в геоинформационной системе // Изв. НВ АУК. 2019б. № 1(53). С. 123–130.

https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-15

Belyakov A.M. Typing of Agricultural Landscapes in the Volgograd Region // Arid Ecosystems. 2021. V. 11. № 1. P. 102–108.

https://doi.org/10.1134/S2079096121010030

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. Art. № 77.

https://doi.org/10.3390/rs14010077

Rulev A.S., Pugacheva A.M. Development of Plant Growing at the Regional Level (Based on the Example of Volgograd Oblast) // Studies on Russian Economic Development. 2019. V. 30. № 5. P. 557–562.

https://doi.org/10.1134/S1075700719050113

Mapping of Arable Lands in Agro-Landscapes of the Volgograd Region According to Remote Sensing Data

K. P. Sinelnikova¹, A. N. Berdengalieva¹, Sh. Matveev¹, V. V. Balynova¹, and A. V. Melikhova¹

¹Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center of Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences" (Federal Research Center of Agroecology of the Russian Academy of Sciences), Volgograd, Russia

Currently, more and more attention is being paid to the development of technologies for satellite monitoring of land use and the state of agricultural landscapes. The lack of up-to-date information about the boundaries of individual agricultural fields does not allow us to fully assess the state of arable land and take them into account. The available statistical sources have discrepancies and do not have information about the spatial distribution of used and unused agricultural fields. The purpose of this work is to establish the spatial distribution of cultivated and uncultivated arable lands of the Volgograd region according to remote sensing data. The paper presents the results of mapping the actual boundaries of arable lands of the Volgograd region as of 2021. High-resolution Sentinel-2 and Google Earth PRO data in the geographic information program QGIS3 were used to decrypt arable land. As a result, 6.05 million hectares of arable land were mapped. The data obtained were compared with official statistics for 2021, as a result of which, an excess of 12% was noted in comparison with the results of decryption. It is noted that over the past 20 years, according to statistical data, the areas of arable land and deposits have practically not changed. When comparing the decryption results with the data on arable lands of the Vega service, a difference of 4% was noted, which is quite high accuracy. According to the All-Russian Agricultural Census of 2016, the area of arable land used was exceeded by 8%. According to the SRTM digital terrain model, morphometric parameters of arable land were calculated throughout the region. It is determined that agricultural fields are located mainly on the slopes of the western exposure (37%), which is due to the predominance of the general slope of the relief to the west. Most (78%) of the field areas are on slopes with a steepness of up to 1°, and about 2% occupy areas of more than 3°. Water erosion is noted on steep slopes. The smoothest relief in the Volga region is on the territory of the Caspian lowland. Using re-

95

mote methods, the assessment of the areas of fallow lands was carried out: about 960 thousand hectares. According to various sources, from 4.8 to 891 thousand hectares of unused arable land are noted. The resulting geoinformation basis will allow to fully account for and assess the condition of cultivated and uncultivated arable lands, as well as to develop projects for the rational use of land resources to increase yields and prevent degradation of agricultural landscapes.

Keywords: agricultural landscape, arable lands, GIS technologies, morphometric analysis, remote sensing, Volgograd region

REFERENCES

Barabanov A.T., Fomin S.D., Kulik A.V., Vypova A.V. K voprosu o stokoreguliruyushchey roli lesomeliorativnykh i agrotekhnicheskikh protivoerozionnykh meropriyatiy [On the issue of the flow-regulating role of forest reclamation and agrotechnical erosion control measures] // Izvestiya NV AUK. 2019. № 3(55). P. 24–35. (In Russian). https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-03-2

Bartalev S.A., Egorov V.A., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Raspoznavanie pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnikh sputnikovykh dannykh spektroradiometra

mogoletnikh sputnikovykh dannykh spektroradiometra MODIS i lokal'no-adaptivnoy klassifikatsii [Recognition of arable lands based on long-term satellite data of the MODIS spectroradiometer and locally adaptive classification] // Komp'yuternaya optika. 2011. V. 35. \mathbb{N} 1. P. 103–116. (In Russian).

Belyakov A.M. Typing of Agricultural Landscapes in the Volgograd Region // Arid Ecosystems. 2021. V. 11. № 1. P. 102–108.

https://doi.org/10.1134/S2079096121010030

Berdengalieva A.N., Berdengaliev R.N. Sviaz' sezonnoi dinamiki ozimoy pshenitsy i rel'efa v podzone yuzhnykh chernozemov Volgogradskoy oblasti [Connection of seasonal dynamics of winter wheat and relief in the subzone of southern chernozems of the Volgograd region] // Nauchno-agronomicheskiy zhurnal. 2022. № 3(118). P. 49–56. (In Russian).

https://doi.org/10.34736/FNC.2022.118.3.007.49-56

Denisov P.V., Troshko K.A., Poletskaia A.Yu., Gogacheva N.A., Lennik A.V., Lupyan E.A., Antoshkin A.A., Kashnitskiy A.V., Kobets D.A., Plotnikov D.E., Proshin A.A., Tolpin V.A. Pervye rezul'taty kontrolya dannykh sel'skokhozyaistvennoy mikroperepisi 2021 goda s ispol'zovaniem sredstv sputnikovogo monitoringa [The first results of the control of agricultural micro-recording data in 2021 using satellite monitoring tools] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19. № 6. P. 308– 314. (In Russian).

https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-6-308-314

Denisova E.V. Ispol'zovanie GIS-tekhnologiy dlya sozdaniia lokal'noy geoinformatsionnoy sistemy ucheta oroshaemykh ugodiy [The use of GIS technologies to create a local geoinformation system for the accounting of irrigated lands] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2022. № 4. P. 86–96. (In Russian).

https://doi.org/10.31857/S0205961422030046

Denisova E.V. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya s primeneniem GIS-tekhnologiy [Assessment of the efficiency of agricultural land use using GIS technologies] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2021. № 5. P. 15–24. (In Russian). https://doi.org/10.31857/S0205961421050031 Gorokhova I.N., Filippov D.V. Primenenie geoinformatsionnykh tekhnologiy i materialov kosmicheskoy s'emki dlya monitoringa oroshaemykh zemel' Svetloyarskoy orositel'noy sistemy (Volgogradskaya oblast') [Application of geoinformation technologies and space survey materials for monitoring irrigated lands of the Svetloyarsk irrigation system (Volgograd region)] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2017. № 4. P. 79–87. (In Russian).

https://doi.org/10.7868/S020596141704008X

Gosudarstvennyi (natsionalnyi) doklad o sostoianii i ispolzovanii zemel v Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu [State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2021] / Eds Zakharova Zh.Yu. Moscow: Rosreestr, 2022. 206 p. (In Russian).

Itogi Vserossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy perepisi 2016 goda po Volgogradskoy oblasti: V 6 t. / Terr. organ Fed. sluzhby gos. statistiki po Volgograd. obl. [The results of the All-Russian Agricultural Census of 2016 in the Volgograd region: In 6 volumes / Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Volgograd Region]. Volgograd: Volgogradstat, 2018. V. 3: Zemel'nye resursy i ikh ispol'zovanie. 140 p. (In Russian).

Krasnoschekov V.N., Fomenko Yu.P. Otsenka vliyaniya khozyaystvennoy deyatel'nosti na sostoyanie agrolandshaftov Volgogradskoy oblasti [Assessment of the impact of economic activity on the state of agricultural landscapes of the Volgograd region] // Prirodoobustroystvo. 2015. № 2. P. 93–98. (In Russian).

Kravchenko E.I., Mukhin Iu.P., Brylev V.A., Kharlanov V.A., Sazhin A.N., Samborskii Iu.P., Anisimov A.A., Ivanov I.V., Chursin B.P., Vorobev A.V., Mattis G.Ia., Semeniutina A.V., Kriuchkov S.N., Kubantsev B.S., Chernobai V.F., Markova E.K., Koliakin N.N., Riabinina N.O., Shabunina I.M. Prirodnye usloviia i resursy Volgogradskoi oblasti [Natural conditions and resources of the Volgograd region]. Volgograd: Peremena, 1995. 264 p. (In Russian).

Kulik K.N., Barabanov A.T., Manaenkov A.S., Kulik A.K. Obosnovanie prognoza razvitiya zashchitnogo lesorazvedeniya v Volgogradskoy oblasti [Justification of the forecast of the development of protective afforestation in the Volgograd region] // Problemy prognozirovaniya. 2017. $N \otimes 6(165)$. P. 93–100. (In Russian).

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). Art. № 77.

https://doi.org/10.3390/rs14010077

Lupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. Tsentr kollektivnogo polzovaniia sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlia resheniia zadach izucheniia i monitoringa okruzhaiushchei sredy [Center for collective use of systems for archiving, processing and analysis of satellite data of the ICI RAS for solving problems of studying and monitoring the environment] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa. 2015. T. 12. \mathbb{N} 5. P. 263–284. (In Russian).

Matveev Sh. Geoinformatsionnoe kartografirovanie sovremennogo sostoianiya sel'skokhozyaystvennykh territoriy Novoanninskogo rayona Volgogradskoy oblasti [Geoinformation mapping of the current state of agricultural territories of the Novoanninsky district of the Volgograd region] // Prirodnye sistemy i resursy. 2022. V. 12. № 2. P. 36–42. (In Russian).

https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.2.5

Melikhova A.V. Morfometricheskiy analiz agrolandshaftov perekhodnoy zony yuzhnykh chernozemov i temno-kashtanovykh pochv Volgogradskoy oblasti [Morphometric analysis of agricultural landscapes of the transition zone of southern chernozems and dark chestnut soils of the Volgograd region] // Prirodnye sistemy i resursy. 2022. V. 12. № 4. P. 26–33. (In Russian).

https://doi.org/https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.4.3

Natsional'nyy atlas pochv Rossiyskoy Federatsii [National Atlas of Soils of the Russian Federation]. 2011. M.: Astrel': Ast. 632 p. (In Russian).

Natsional'nyy doklad. "Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnye meropriyatiya (sel'skoe i lesnoe khoziaistvo)" [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).

Rulev A.S., Kosheleva O.Yu., Shinkarenko S.S. Geomorfologicheskie kriterii provedeniya lesomelioratsii landshaftov (na primere Priel'ton'ya) [Geomorphological criteria for forest reclamation of landscapes (on the example of the Elton region)] // Geomorfologiya. 2017. № 2. P. 63–71. (In Russian).

https://doi.org/10.15356/0435-4281-2017-2-63-71

Rulev A.S., Pugacheva A.M. Development of Plant Growing at the Regional Level (Based on the Example of Volgograd Oblast) // Studies on Russian Economic Development. 2019. V. 30. № 5. P. 557–562.

https://doi.org/10.1134/S1075700719050113

Rulev A.S., Shinkarenko S.S., Bodrova V.N., Sidorova N.V. Geoinformatsionnye tekhnologii v obespechenii tochnogo zemledeliya [Geoinformation technologies in the provision of precision agriculture] // Izvestiya NV AUK. 2018. N $_{2}$ 4(52). P. 115–122. (In Russian).

Rulev A.S., Yuferev V.G., Yuferev M.V. Geoinformatsionnoe kartografirovanie i modelirovanie erozionnykh landshaftov [Geoinformation mapping and modeling of erosion land-scapes]. Volgograd: Vserossiiskii nauchno-issledovatelskii agrolesomeliorativnyi institut, 2015. 153 p. (In Russian).

Shinkarenko S.S., Bodrova V.N., Sidorova N.V. Vliyanie ekspozitsii sklonov na sezonnuyu dinamiku vegetatsionnogo indeksa NDVI posevnykh ploschadey [The influence of slope exposure on the seasonal dynamics of the vegetation index NDVI of acreage] // Izvestiya NV AUK. 2019a. \mathbb{N}° 1(53). P. 96–105. (In Russian).

https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-12

Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Solodovnikov D.A., Pugacheva A.M. Analiz pastbischnykh resursov Volgogradskoy oblasti v geoinformatsionnoy sisteme [Analysis of pasture resources of the Volgograd region in the geoinformation system] // Izvestiya NV AUK. 2019b. № 1(53). P. 123–130. (In Russian).

https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-15

Sinel'nikova K.P. Geoinformatsionnyy analiz sovremennogo sostoianiya agrolandshafta Donskoy gryady [Geoinformation analysis of the current state of the agricultural landscape of the Don ridge] // Nauchno-agronomicheskiy zhurnal. 2020. № 3(110). P. 9–17. (In Russian). https://doi.org/10.34736/FNC.2020.110.3.002.9-16

Terekhin E.A. Otsenka sezonnykh znacheniy vegetatsionnogo indeksa (NDVI) dlya detektirovaniya i analiza sostoianiya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur [Assessment of seasonal values of the vegetation index (NDVI) for detecting and analyzing the state of crops] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2015. № 1. P. 23–31. (In Russian). https://doi.org/10.7868/S0205961415010108

Vasil'chenko A.A. Opyt razrabotki lokal'noy GIS oroshaemykh zemel' Volgo-Akhtubinskoy poimy na territorii Volgogradskoy oblasti [Experience in developing a local GIS of irrigated lands of the Volga-Akhtuba floodplain in the Volgograd region]. InterKarto. InterGIS. 2022. V. 28. Ch. 2. P. 761–772. (In Russian).

https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-2-28-761-772

Vorob'ev A.V. Zemel'naya reforma v Volgogradskoy oblasti (Izmeneniya sel'skokhozyaistvennogo zemlepol'zovaniya regiona v 1990–2010 gody) [Land reform in the Volgograd region (Changes in agricultural land use in the region in 1990–2010)]. Volgograd: Volgogradskiy GAU, 2014. 164 p. ISBN 978-5-85536-866-6. (In Russian).