

АНАЛИЗ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ КА ДЗЗ ИЗ КОСМОСА И СООТВЕТСТВУЮЩИХ НАБОРОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЗАСУХИ

Чумарев И.С., Беленко В.В.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,

105064, Москва, Россия

e-mail: ivan.chumarev@gmail.com

Статья посвящена выявлению ряда наборов пространственных данных ДЗЗ (дистанционного зондирования Земли) из космоса и соответствующих им наборов пространственных данных, применимых для выявления сельскохозяйственной засухи из номенклатуры существующих на орбите и планируемых к запуску космических аппаратов. С этой целью к анализируемой целевой аппаратуре (ЦА) выдвигается ряд технических критериев, поставленных в соответствие природным процессам, протекающим одновременно с сельскохозяйственной засухой или являющихся её факторами. Выбраны девять факторов, каждому из которых поставлен в соответствие количественный показатель, измеримый посредством целевой аппаратуры ДЗЗ из космоса. Каждый показатель охарактеризован с точки зрения требований по пространственному и временному разрешению, а также по продолжительности наблюдений. В результате идентифицировано 49 наборов пространственных данных, охарактеризованных по собственным пространственно-временным характеристикам, уровню тематической обработки, частоте обновления и доступности для загрузки.

Ключевые слова: сельскохозяйственная засуха, ДЗЗ из космоса, данные ДЗЗ из космоса, пространственные данные, целевая аппаратура, пространственно-временной анализ.

ANALYSIS OF SATELLITE REMOTE SENSING INSTRUMENTS AND CORRESPONDING GEOSPATIAL DATASETS FOR AGRICULTURAL DROUGHT DETECTION

Chumarev I.S., Belenko V.V.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

This article aims to identify satellite remote sensing instruments and the corresponding geospatial datasets applicable for detecting agricultural drought by analyzing remote sensing satellite missions, both in-orbit and planned. Several technical criteria are applied to the instruments under review, capturing natural processes that either coincide with agricultural drought or act as its driving factors. Nine factors influencing the onset and development of agricultural drought were selected, and each was put in correspondence with a quantitative indicator measurable by satellite remote sensing. Each indicator was then characterized in terms of the spatial and temporal resolution required, along with the duration of observations. As a result, 49 geospatial datasets were identified and characterized by their spatiotemporal properties, level of thematic processing, update frequency, and availability for public use.

Keywords: agricultural drought, satellite remote sensing, satellite data, geospatial data, remote sensing instruments, spatiotemporal analysis.

Введение

Сельскохозяйственная засуха характеризуется уменьшением влажности почвы, что приводит к стрессу растений, снижению биопродуктивности и урожая. Особенно тяжелые засухи до сих пор приводят к голоду и жертвам в некоторых регионах – по статистике Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием, в 1970-2019 гг. от голода, вызванного засухой, погибли 650 тыс. человек.

По скорости развития засухи, в отличие от наводнений, пожаров и землетрясений, относятся к медленно развивающимся стихийным бедствиям и требуют продолжительных и систематических наблюдений. Получение сведений о засухе путем анализа данных, собранных посредством целевой аппаратуры (ЦА) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ из космоса) может позволить осуществлять выявление сельскохозяйственной засухи на заданном масштабе (от объектового до глобального), на регуляр-

ной основе (с частотой наблюдений от 30 минут до года и более), с опорой на архивные данные разной долгосрочности.

Статья преследует цель идентифицировать ЦА ДЗЗ из космоса, составить перечень соответствующих выдвинутым требованиям образцов этой аппаратуры и представить выборку наборов пространственных данных, подходящих для задачи выявления сельскохозяйственной засухи независимо от региона исследований, т.е. в глобальном масштабе. Данная задача решается посредством отслеживания ряда факторов, которые могут влиять на этот феномен или являться его показателями [1].

Предметом исследования являются совокупность наблюдаемых объектов и феноменов наземно-воздушной, почвенной, водной и организменной природных сред, различные факторы которых приведены в табл. 1 и взаимодействие между ними, а также технические характеристики, история эксплуатации и выходные продукты ЦА ДЗЗ из космоса.

Многие научные работы представляют перечни ЦА ДЗЗ, применяющейся в задачах выявления засухи различных типов, в т.ч. сельскохозяйственной засухи [2]. Их анализ показал, что номенклатура ЦА преимущественно составляется с опорой на цитирование научных работ и практику применения данных, а не исходя из технических характеристик де-факто функционирующих в мире систем ДЗЗ из космоса. Таким образом, перечень систем, упоминаемых в контексте поставленной задачи, ограничивается несколькими популярными наименованиями. Учитывая развертывание множества национальных и частных систем и комплексов ДЗЗ из космоса, задачей данной работы является исследование соответствия существующей номенклатуры ЦА ДЗЗ из космоса требованиям к задаче выявления сельскохозяйственной засухи посредством анализа изображений заданного временного и пространственного разрешений, характеризующихся актуальностью и приемлемой степенью доступности.

Материалы и методы исследования

База данных Всемирной метеорологической организации OSCAR, использованная в качестве основного источника информации, включает в себя 1160 уникальных профилей-описаний ЦА ДЗЗ из космоса, принадлежащих 77 государственным или частным организациям и функционировавших с 1960 по 2025 гг., а также планируемых к запуску вплоть до 2035 г. В нее включены все основные КА,

системы и комплексы ДЗЗ из космоса, использующиеся в гражданских целях. Привязка к теме метеорологии, являющейся основной тематикой сервиса OSCAR, позволяет производить предварительную оценку пригодности того или иного образца ЦА ДЗЗ из космоса для наблюдения того или иного фактора сельскохозяйственной засухи. Последовательность действий, составляющих данное исследование, приведено на рис. 1.

Разделение на этапы поиска ЦА и наборов пространственных данных, а также их подразделение на два типа по уровню обработки, позволяет проследить цепочку создания данных для анализа, идентифицируя ЦА и данные, не дошедшие до этапов производной и тематической обработки, но обладающие данным потенциалом. В случае ненахождения хотя бы одного набора данных для каждого рассматриваемого фактора, посредством экспертной оценки производится смягчение требований и повторная процедура поиска. Т.к. сельскохозяйственная засуха имеет свойство охватывать крупные регионы, а съемка посредством ЦА ДЗЗ из космоса имеет широкий охват, первоочередным было смягчение требований по пространственному разрешению. Во вторую очередь производилось смягчение требований по временному разрешению в силу невысокого темпа развития сельскохозяйственной засухи по сравнению с другими чрезвычайными ситуациями. Смягчение требований по продолжительности

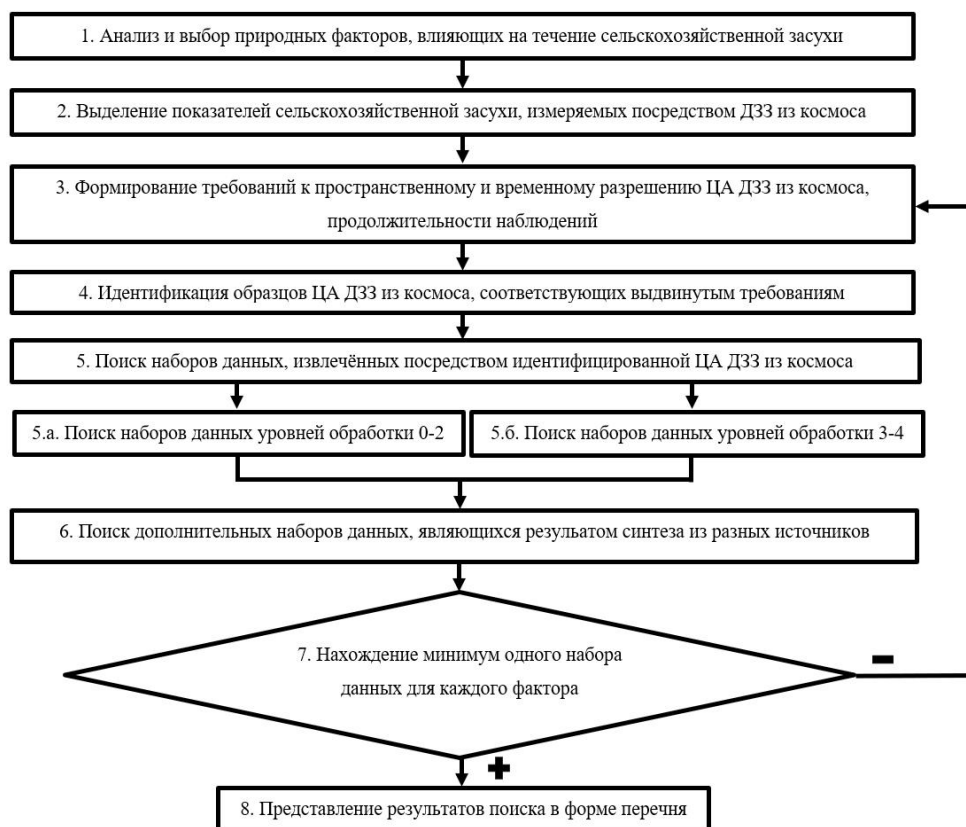


Рис. 1. Блок-схема поиска ЦА ДЗЗ из космоса и наборов пространственных данных для выявления сельскохозяйственной засухи

наблюдений производилось в последнюю очередь, т.к. многолетние средние значения исследуемых показателей являются ключевым аспектом корректной интерпретации их динамики, позволяя учитывать многолетние тенденции и климатические особенности исследуемой территории.

Помимо научных статей, при составлении статьи использовались нормативно-правовые документы (ГОСТ Р 59753-2021), отраслевые порталы (WMO OSCAR, eoPortal, Google Earth Engine Data Catalog, Remote Sensing Systems), материалы университетов и исследовательских институтов (Caltech, Jet Propulsion Laboratory, USGS), базы данных космических агентств и спутниковых операторов (Copernicus Land Service, ESA Climate Office, EUMETSAT, LP DAAC, NASA Earth Sciences, NOAA CLASS, NSOAS), отчеты международных организаций (Всемирной метеорологической организации, Конвенции Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием).

Анализ факторов, влияющих на течение сельскохозяйственной засухи

Факторы, наблюдаемые посредством ДЗЗ из космоса и влияющие на течение сельскохозяйственной засухи, либо являющиеся ее показателями, были выбраны путем анализа взаимодействий, происходящих в четырех природных средах: наземно-воздушной, водной, почвенной и организменной. Каждому фактору поставлен в соответствие один измеряемый количественный показатель. К наземно-воздушной среде отнесены атмосферные осадки, температура воздуха приземного слоя атмосферы и действительная эвапотранспирация. К водной среде – площадь поверхностных вод, общий объем вод, включая грунтовые воды, а также площадь снежного и ледникового покрова. К почвенной среде – свойства почвы и температура земной поверхности. К организменной среде – состояние растений, оцениваемое посредством индексов вегетации [3].

К дополнительным факторам и показателям, наблюдаемым посредством ДЗЗ, но не входящим в число исследуемых, относятся явления общей

циркуляции атмосферы, назначение и использование земель, интенсивность солнечной радиации и др. Выбранные факторы, влияющие на развитие сельскохозяйственной засухи, соответствующие им природные среды и выбранные измеряемые величины, являющиеся соответствующими факторам измеряемыми показателями, приведены в табл. 1. Показатели могут измеряться как абсолютные и относительные величины, т.е. в виде приближенного определения физических величин или безразмерных индексов.

Атмосферные осадки и температура воздуха оказывают определяющее значение на состояние экосистем и являются ведущим фактором, влияющим на их состояние и развитие, оказывая отложенное воздействие на большинство остальных факторов развития сельскохозяйственной засухи [4].

Действительная эвапотранспирация, т.е. суммарное испарение влаги с поверхностей элементов водной, почвенной и организменной сред в атмосфере, находится в положительной зависимости от нехватки почвенной влаги, и ее недостаток выступает в роли причины засух в условиях умеренного климата [5]. Измерения суммарной и потенциальной эвапотранспирации показали результаты для выявления и мониторинга засухи в региональном масштабе [6].

Влажность почвы – важнейшее свойство почв, изменение которой характеризует способность почв адаптироваться к метеорологическим условиям и обеспечивать корневое питание сельскохозяйственных растений [7].

Температура земной поверхности, измеряемая дистанционно, может характеризовать любой наземный объект, однако в контексте исследования засухи наибольшее значение имеет температура почвы и растительного покрова. Более высокие значения данного показателя могут указывать на сельскохозяйственную засуху в силу неспособности почвенной и организменной среды регулировать собственную температуру в условиях стресса, особенно в середине и конце периода вегетации [8].

Таблица 1

Классификация и индикаторы факторов, влияющих на развитие сельскохозяйственной засухи

№	Фактор развития сельскохозяйственной засухи	Показатель сельскохозяйственной засухи	Природная среда
1	Атмосферные осадки	сумма осадков	наземно-воздушная
2	Температура воздуха	температура воздуха	
3	Эвапотранспирация	действительная эвапотранспирация	
4	Влажность почвы	влажность почвы	почвенная
5	Температура земной поверхности	температура земной поверхности	
6	Площадь поверхностных вод	площадь зеркала водной поверхности	водная
7	Общий объем вод	Объем подземных вод	
8	Площадь снежного и ледникового покрова	площадь снежного и ледникового покрова	
9	Состояние и развитие растений	индексы вегетации	организменная

Количественный показатель площади поверхностных вод, а именно площадь зеркала водной поверхности, может служить для косвенной оценки сельскохозяйственной засухи. Ее маркером может послужить степень заполненности резервуаров, используемых в оросительных целях: чем большему стрессу подвержена сельскохозяйственная экосистема, тем больше водных ресурсов потребляется для его смягчения [9].

Подземные воды, в т.ч. грунтовые и артезианские воды, могут являться важным источником орошения, восполнения поверхностных водоемов и питания растений посредством корневой системы [3]. Фактору объема подземных вод соответствует величина общего объема вод на площади территории. Это обусловлено невозможностью прямого измерения объема подземных вод посредством ДЗЗ из космоса [10].

Степень влияния криосферы на состояние сельскохозяйственных угодий варьируется от региона к региону. В умеренных широтах, а также в горной и предгорной местности это влияние может становиться определяющим. Сельскохозяйственные территории предгорий питаются талой водой ледников в весенне-летний период, а измерение их динамики за зимний и ранневесенний период осуществляется посредством ДЗЗ из космоса [11].

Оценка состояния и развития растений осуществляется преимущественно посредством анализа индексов вегетации, вычисляемых по данным многоспектральной, гиперспектральной и микроволновой ЦА. Помимо исследования засух, данный подход активно применяется для мониторинга сельскохозяйственных культур [12].

Каждый фактор, влияющий на течение сельскохозяйственной засухи, анализируется на предмет пространственной и временной изменчивости и распределяется по категориям изменчивости, приведенным в табл. 2. В пространственном разрезе, т.е. по минимальному масштабу наблюдаемых изменений, вводятся следующие категории: объектовый, локальный, региональный. По временной изменчивости, т.е. по временным отрезкам, в которых наблюдаются существенные изменения каждого

фактора, вводится подразделение на внутрисуточные, внутрисеasonные, сезонные и долгосрочные. Категории масштабности продиктованы существующими стандартами категоризации спутниковых снимков по пространственному разрешению, а категории временной изменчивости введены в соответствии с периодизацией наблюдений популярных наборов пространственных данных, выпускаемых для периодов в 30 минут, 1 час, 12 часов, сутки, 8 дней, декада, 16 дней, месяц, год, и т.п. [13].

В качестве дополнительного критерия оценки образцов ЦА ДЗЗ из космоса и соответствующих им наборов пространственных данных вводится требование по продолжительности наблюдений, которые должны превышать десятилетний период, принятый за минимальный промежуток времени, на котором наблюдения можно считать долгосрочными. В отдельных случаях возможно совместное использование данных из разных источников при условии обеспечения их преемственности. Набор требований, выбранных для данного исследования с учетом описаний показателей сельскохозяйственной засухи, приведен в табл. 3.

Требования выдвигаются методом экспертной оценки, учитывая особенности задачи региональный контекст и вычислительные возможности. В итоге каждому искомому набору данных ДЗЗ из космоса соответствует требуемое пространственное разрешение (ПР), временное разрешение (ВР) и продолжительность непрерывных наблюдений. Выдвижение требований имеет целью структурировать поиск и оценить соответствие существующей номенклатуры ЦА ДЗЗ из космоса и соответствующих наборов данных решаемой задаче.

Наборы данных для анализа факторов наземно-воздушной среды

Исследование сельскохозяйственной засухи посредством анализа влияния на нее факторов наземно-воздушной среды может производиться посредством пяти групп ЦА и девяти соответствующих наборов данных, приведенных в табл. 4.

Сумма осадков. Набор данных GMI GPROF является основным продуктом ЦА GMI KA GPM Core Observatory уровня обработки 2, имеет

Таблица 2

Соответствие параметров факторов, влияющих на развитие сельскохозяйственной засухи требованиям к ЦА ДЗЗ из космоса и соответствующим им наборам данных

Параметр	Размерность параметра	Соответствующая характеристика данных ДЗЗ	Требование
Масштаб	объектовый	Пространственное разрешение	до 10 м
	локальный		от 10 до 1000 м
	региональный		от 1000 м до 10000 м
Временная изменчивость	внутрисуточная	Временное разрешение	менее 24 ч.
	внутридекадная		от 24 ч. до 10 дней
	сезонная		от 10 дней до вег. периода
	долгосрочная		более вег. периода

Таблица 3

Пример требований по временной изменчивости и масштабу изменений выбранных показателей сельскохозяйственной засухи

№	Показатель сельскохозяйственной засухи	Масштаб	ПР, м	Временная изменчивость	ВР	Продолжит. наблюдений
1	сумма осадков	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	≥10 лет
2	температура воздуха	региональный	1000-10000	внутридневная	<24 ч.	
3	действительная эвапотранспирация	объектовый	<10	внутридневная	<24 ч.	
4	влажность почвы	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
5	температура земной поверхности	локальный	10-1000	внутридневная	<24 ч.	
6	площадь зеркала водной поверхности	локальный	10-1000	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
7	общий объем вод	локальный	10-1000	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
8	площадь снежного и ледникового покрова	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
9	индексы вегетации	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	

Таблица 4

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам наземно-воздушной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
сумма осадков	GMI	GMI GPROF	IMERG GSMaP
температура воздуха	AIRS, AMSU	AIRS2RET	AIRS3STD
	AVHRR/3, HIRS, MSU, SSU	NOAA AVHRR GAC Level 2 Atmospheric Profiles	–
действительная эвапотранспирация	MODIS	–	MOD16A2, MYD16A2
	SMAP, SMOS, AMSR2, MODIS	–	GLEAM4

пространственное разрешение 0.1° (10 км на экваторе), характеризуется временным разрешением в 12-24 ч. и существует с 2014 г. Он составляет основу для расчета тематических наборов данных IMERG и GSMaP, являющимися синтезом по меньшей мере 10 единиц ЦА, в т.ч. вышедших из строя, например, TRMM. Наборы данных IMERG и GSMaP, составляемые агентствами NASA и JAXA соответственно, используются для расчета индексов осадков и их дефицитов, которые могут быть применены для самостоятельного анализа засухи, либо становятся вводными для моделей влажности почвы и гидрологических моделей [14]. Установленная на КА серии FengYun-3 ЦА MWRI (англ. Microwave Radiation Imager) может стать применимой при дальнейшем смягчении требований по пространственному разрешению, при соответствии требованиям по продолжительности наблюдений [15].

Температура воздуха. Температурные наборы данных ЦА AIRS и AMSU представляют измерения на различных уровнях атмосферного давления от 1 гПа до 1000 гПа, при идеальных условиях соответствующие нижней границе мезосферы и уровню моря [16]. Данные уровня 2 AIRS2RET имеют пространственное разрешение 45 км, а данные уровня 3 AIRS3STD – около 111 км. Данные AIRS применяются в процессе выявления засухи в проекте US

Drought Monitor, а также использовались для раннего выявления засухи [17]. Набор данных NOAA AVHRR GAC Level 2 Atmospheric Profiles, формируемый посредством ЦА AVHRR/3, HIRS, MSU и SSU, имеет пространственное разрешение 100 км на пиксель и отличается наиболее долгой продолжительностью наблюдений, включая непрерывные данные с 1979 г.

Действительная эвапотранспирация. Наборы данных MOD16A2 и MYD16A2, соответствующие КА Terra и Aqua, предоставляют средние восьмидневные значения действительной и потенциальной эвапотранспирации пространственного разрешения 500 м. Набор данных GLEAM4, вычисления которого основаны на физической модели Пенмана-Монтейта, предоставляет данные о действительной и потенциальной эвапотранспирации, а также более десяти дополнительных параметров. Он формируется с ежедневным временным шагом и имеет пространственное разрешение в 10 км на пиксель, но обновляется, как правило, один раз в год [18], что делает его использование невозможным для оперативного мониторинга.

Наборы данных для анализа факторов почвенной среды

Исследование сельскохозяйственной засухи посредством анализа факторов почвенной среды

возможно с опорой на пять групп ЦА и соответствующе им 18 наборов данных, приведенных в табл. 5.

Влажность почвы. Наборы данных ЦА SMAP и SMOS доступны для всей цепочки уровней обработки и используются для изучения влажности почвы, начиная с уровня обработки 2 [19]. Наборы данных SMAP уровней 3 и 4, а именно SPL3SMP_E/006 и SPL4SMGP/007, имеют пространственное разрешение 9 км и предоставляют оценки влажности почвы на поверхности (до 5 см) и зоне корней (до 1 м), соответственно [20]. Эти данные часто используются в сочетании с индексами вегетации, температурой земной поверхности и другими показателями засухи, а также служат входными данными для климатических моделей. Проект SMOS существует на пять дольше, чем SMAP. Выходные данные SMOS характеризуются пространственным разрешением в 35-50 км и 25 км для продуктов уровней обработки 2 и 3, соответственно. Достоверность данных SMAP в целом оценивается выше, чем SMOS, однако значительные улучшения были достигнуты с выходом набора данных SMOS-IC за счет дополнительного вычисления параметра оптической толщины растительности (англ. vegetation optical depth) и улучшенного алгоритма калибровки яркостных температур [7].

Набор данных SGD-SM 2.0 имеет 25-километровое пространственное разрешение, доступен с 2015 г. и обновляется ежедневно, аналогично продуктам уровней обработки 3 и 4 SMAP и SMOS. Он составляется посредством цепочки алгоритмов машинного обучения на основании данных радиолокационной ЦА WindSat и серии AMSR низкого пространственного разрешения. Валидационные исследования показали, что SGD-SM 2.0 не всегда соответствует данным SMAP и SMOS, однако представляет им альтернативу, выигрывает в аспекте географической непрерывности покрытия, и тем самым более применимы для глобальных исследований [21].

Температура земной поверхности. Наборы данных для отслеживания температуры земной поверхности MODIS и VIIRS используются для выявления засухи самостоятельно и в сочетании с другими

источниками данных – например, посредством индексов TCI, VHI, TVDI [22]. Они отличаются высокой степенью достоверности, пройдя многие этапы кросс-валидации между собой и с наблюдениями наземных метеорологических сетей [8]. Наблюдения MODIS и VIIRS более продолжительны, чем наблюдения SMAP и SMOS для влажности почвы, и отличаются гораздо более высоким пространственным разрешением, однако их непрерывность зависит от облачности.

Наборы данных VNP21A1D.002, VNP21A1N.002, MOD11A1, MYD11A1, MOD11A2 и MYD11A2 имеют пространственное разрешение 1 км на пиксель. Достоверность, соответствующих дневным и ночным наблюдениям, соответствует международному стандарту GCOS (англ. Global Climate Observing System); ночные наблюдения признаются более точными, особенно после долгосрочного усреднения. VNP21A1D.002, VNP21A1N.002, MOD11A1 и MYD11A1 предоставляют ежедневные значения температуры земной поверхности, а MOD11A2 и MYD11A2 – восьмидневные средние. Для проведения оперативного мониторинга, наборы данных ЦА MODIS, публикуемые через 1-2 сут. после зондирования, выгодно отличаются от ЦА VIIRS, для которой временной отрезок между сбором и публикацией данных о температуре земной поверхности может достигать 1-2 месяцев [8].

Наборы данных для анализа факторов водной среды

Для анализа влияния факторов водной среды на развитие сельскохозяйственной засухи были идентифицированы 20 наборов данных, производимых посредством семи единиц ЦА или их комбинаций, представленных в табл. 6.

Площадь зеркала водной поверхности. Площадь водных объектов – параметр, отслеживаемый значительным количеством ЦА и имеющий максимальное число соответствующих наборов данных благодаря разнообразию способов выявления воды дистанционными методами, в т.ч. посредством несложных операций со спектральными каналами синего и ближнего инфракрасного каналов [23]. Данные китайской ЦА CZI уровней обработки 1-2,

Таблица 5

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам почвенной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
влажность почвы	SMAP	SPL1BTB SPL2SMP	SPL3SMP_E/006 SPL4SMGP/007
	SMOS	L2 SM, SMOS-IC	L3 Daily SM/TB
	AMSR-E, AMSR2, Windsat	–	SGD-SM 2.0
температура земной поверхности	VIIRS	VNP09GA VNP09H1	VNP21A1D.002 VNP21A1N.002
	MODIS	MOD11_L2 MYD11_L2	MOD11A1, MYD11A1 MOD11A2, MYD11A2

Таблица 6

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам водной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
<i>площадь зеркала водной поверхности</i>	CZI	Портал NSOAS	–
	MODIS	MOD09GQ MYD09GQ MOD09Q1 MYD09Q1 MOD09A1 MYD09A1	MOD09GA MYD09GA MOD28C2
	VIIRS	VNP09GA VNP09A1	VNP28C2
	MSI, OLI, OLI2	–	OPERA DSWxHLS
	OLI, TM, ETM+	–	GSWE
<i>общий объём вод</i>	MWI (GRACE-FO)	–	GRACE/GRACE-FO Level 3 Total Water Storage Anomalies (TWSA)
<i>площадь снежного и ледникового покрова</i>	MSI	S2MSI2A S2_SR	COPERNICUS/S2_SNOW

представляющие излучательную яркость на верхней границе атмосферы и отражательную способность земной поверхности соответственно, доступны для загрузки на портале Национального центра спутникового океановедения Китая NSOAS. Они имеют пространственное разрешение 50 м и прошли валидацию при исследованиях водных объектов на территории Китая [24].

Наборы данных ЦА MODIS серии MOD09 и MYD09 включают отражательную способность поверхности в диапазонах, необходимых для расчета индексов NDWI и различаются по пространственному (от 250 м до 500 м) и временному (ежедневные и восьмидневные) разрешениям. Расчет индекса MNDWI, задействующего коротковолновой инфракрасный диапазон, также возможен посредством всех наборов данных этой серии, за исключением характеризующихся наиболее высоким пространственным разрешением MOD09GQ и MYD09GQ [23]. Публикуясь с минимальной задержкой, эти данные могут служить основой для оперативного мониторинга площади поверхностных вод.

При смягчении требований по пространственному разрешению с локального масштаба до регионального, возможно использование наборов данных VNP28C2 и MOD28C2, получаемых посредством ЦА VIIRS и MODIS, соответственно. Они используются для отслеживания площади, уровня и объема поверхностных вод с 8-дневной периодичностью. Набор данных ЦА VIIRS составляется с использованием более совершенного алгоритма и имеет более высокое пространственное разрешение в 375 м, чем MOD28C2 (500 м). Ежегодно формируется глобальная карта водных объектов MOD44W, доступная для всей продолжительности функционирования КА Aqua и Terra.

В рамках проекта OPERA DSWx генерируются два набора данных, DSWx-S1 группировки КА

Sentinel-1 и DSWx-HLS, представляющий собой совместные данные группировки Sentinel-2 и КА Landsat 8 и Landsat 9. DSWx-HLS отличается более частой обновляемостью в 2-4 сут. по сравнению с 6-12 сут., необходимыми для повторного пролета Sentinel-1, при равных пространственных разрешениях в 30 м. DSWx-HLS в целом характеризуется несколько высшей точностью [25].

Набор данных GSWE, сформированный по наблюдениям КА Landsat 4,5,7,8 и 9, формируется с 1984 г. и включает данные о заполненности пикселя водными объектами с различной степенью вероятности. Он имеет пространственное разрешение в 30 м для всего срока наблюдений и обновляется каждые 8 дней при штатной работе КА Landsat 8 и 9.

Общий объём вод. Набор данных GRACE/GRACE-FO Level 3 Total Water Storage Anomalies (TWSA) имеет пространственное разрешение 1 град. (111 км у экватора) и временное 1 мес. Данные проходят обработку, преобразуясь из сферических гармонических коэффициентов гравитационного поля Земли или данных о массовой концентрации уровня обработки 2, что обуславливает их задержку на 2-4 мес. и невозможность применения для оперативного мониторинга. Данные миссии GRACE-FO доступны с 2018 г. и могут использоваться совместно с данными изначальной миссии GRACE для увеличения продолжительности наблюдений до 2002 г. за исключением периода с июля 2017 г. по июнь 2018 г. между выводом из эксплуатации пары КА GRACE и запуском миссии GRACE-FO [15].

Площадь снежного и ледникового покрова. Наборы данных, применяемые для отслеживания текущей линии снежного покрова, включают в себя различные продукты MODIS, набор данных GMSI, составляемый посредством ЦА AVHRR, AMSR2, GMI спутников MetOp-B, MetOp-C, GCOM-W, GPM. Данные обновляются ежеднев-

но, однако предоставляются с задержкой на один год и имеют пространственное разрешение 2-4 км. Продукты MOD10A1, MYD10A1 ЦА MODIS обладают схожими временным разрешением, максимальным пространственным разрешением 500 м на пиксель и становятся доступными в течение суток или нескольких дней. Наборы данных группировки Sentinel-2, а именно S2MSI2A и S2_SR, характеризуются одинаковыми пространственным и временным разрешением в 10 м и 5 сут. Различия между ними ограничиваются методами распространения: S2MSI2A доступен к загрузке посредством тайлов, а S2_SR распространяется через платформу Google Earth Engine. Набор данных COPERNICUS/S2_SNOW предоставляет процентную долю снежного покрова. Анализ динамики снежного покрова редко используется в исследованиях сельскохозяйственной засухи, однако успехи в повышении достоверности данных для разных регионов создает предпосылки для использования этих данных [26].

Наборы данных для анализа факторов организменной среды

Номенклатура индексов вегетации, используемых для оценки состояния и развития растительности, чрезвычайно широка. ВМО рекомендует к четырем из них, а именно EVI (англ. Enhanced Vegetation Index), NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index), VCI (англ. Vegetation Condition Index) и VHI (англ. Vegetation Health Index), являющийся составным индексом [1,27]. В табл. 7 приведены три набора данных, применимых для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам организменной среды посредством вычисления индексов вегетации. Все они производятся посредством ЦА MSI КА серии Sentinel-2.

10-дневные композитные изображения индекса NDVI, имеющие пространственное разрешение 10 м на пиксель, распространяются с задержкой в 3-5 сут. и могут быть использованы для оперативного ежедневного мониторинга растительности [28]. При смягчении требований по пространственному разрешению, могут использоваться многочисленные наборы данных ЦА MODIS, VIIRS и AVHRR, а именно MCD19A3CMG и продукты серии MOD13 (для индекса NDVI), VNP13A1 и VNP16 (для индексов TCI, VCI, VHI), GIMMS NDVI3g+. Все вышеперечисленные наборы данных имеют уровень обработки L3, пространственное разрешение от 250 м до 8 км, временное разрешение от суток до 16 дней [13].

Заключение

Была проанализирована база из более чем 1100 ЦА ДЗЗ из космоса на предмет соответствия требованиям, выдвинутому по девяти параметрам, используемым в качестве показателей сельскохозяйственной засухи, в целях идентификации наборов данных для ее выявления. По результатам поиска, было идентифицировано 19 наборов данных для факторов водной среды, 18 – для факторов почвенной среды, девять – для факторов наземно-воздушной среды, три – для факторов организменной среды.

Изобилие спутниковых систем ДЗЗ из космоса не транслируется в желаемое многообразие наборов спутниковых данных, применимых для эффективного мониторинга и изучения природных процессов, в частности для изучения сельскохозяйственной засухи.

Для того, чтобы запуск новых спутников ДЗЗ приводил к появлению применимых для анализа различных процессов, проходящих на Земле, эти данные должны удовлетворять нижеуказанным требованиям, пройдя соответствующие стадии:

1. Пространственно непрерывное и периодическое покрытие области интереса;
2. Качественная предварительная обработка данных;
3. Тематическая обработка данных и приведение их к формату данных, готовых для анализа (ARD, англ. analysis-ready data);
4. Наличие механизмов, способствующих оперативному получению данных.

Частота покрытия области интереса может варьироваться, однако требования по заданной периодичности первостепенны в силу того, что засуха является медленно развивающимся природным процессом. Вопрос покрытия определяется наличием на околоземной орбите единиц ЦА КА ДЗЗ из космоса с определенными техническими характеристиками. В отношении научных исследований, таких, как выявление сельскохозяйственной засухи, последний пункт в современных условиях предполагает открытое и бесплатное распространение данных. Данные могут стать инструментом для выявления сельскохозяйственной засухи только при соблюдении всех вышеперечисленных условий, из чего может вытекать дальнейшее обсуждение достоверности и качества анализа.

Последующими задачами, выполнение которых необходимо для разработки алгоритма выявления

Таблица 7

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам организменной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
<i>состояние и развитие растительности</i>	MSI	S2MSI2A S2_SR	COPERNICUS/S2_NDVI

сельскохозяйственной засухи посредством ДЗЗ из космоса являются:

- анализ существующих методов выявления сельскохозяйственной засухи, их оценка;
- многокритериальный анализ соответствующих выбранным на данном этапе системам наборов пространственных данных, включая специализированные тематические продукты;

– сбор и анализ лучших практик картографического обеспечения для наглядного представления феномена засухи;

– разработка и реализация алгоритма выявления сельскохозяйственной засухи посредством анализа данных ДЗЗ из космоса;

– верификация предлагаемой методики посредством анализа выходных результатов.

Список литературы

1. Свобода М., Фукс Б. Справочник по показателям и индексам засушливости ВМО. Женева: Всемирная метеорологическая организация. Integrated Drought Management Programme. 2016. 60 с.
2. Mullapudi A., Vibhute A.D., Mali S. et al. A review of agricultural drought assessment with remote sensing data: methods, issues, challenges and opportunities. *Applied Geomatics*. 2022. 13 p. DOI: 10.1007/s12518-022-00484-6.
3. Горышина Т.К. Экология растений: учебное пособие. Москва: Высшая школа. 1979. 368 с.
4. You Z., Sun X., Sun H. et al. Mechanisms of meteorological drought propagation to agricultural drought in China: insights from causality chain. *Natural Hazards*. 2025. V. 2. No. 1. 15 p. DOI: 10.1038/s44304-025-00073-8.
5. Hong S., Deng H., Zheng Z. et al. The influence of variations in actual evapotranspiration on drought in China's Southeast River basin. *Scientific Reports*. 2023. 13 p. DOI: 10.1038/s41598-023-48663-8.
6. Zheng C., Jia L., Hu G. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations. *Journal of Hydrology*. 2022. V. 613. Part B. 21 p. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128444.
7. Fernandez-Moran R., Al-Yaari A., Mialon A. et al. SMOS-IC: An Alternative SMOS Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Product. *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 5. Article 457. 21 p. DOI: 10.3390/rs9050457.
8. Hulley G.C., Freepartner R., Islam T. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Land Surface Temperature and Emissivity Product (VNP21) User Guide. NASA GSFC. 2023. 37 p. URL: https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/VNP21_LSTE_user_guide.pdf.
9. Vicente-Serrano S.M., Gouveia C., Camarero J.J. et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. V. 110. No. 1. Pp. 52-57. DOI: 10.1073/pnas.1207068110.
10. Adams K.H., Reager J.T., Rosen P. et al. Remote sensing of groundwater: Current capabilities and future directions. *Water Resources Research*. 2022. V. 58. No. 10. 27 p. DOI: 10.1029/2022WR032219.
11. Северский И.В. Динамика горной криосферы Балкаш-Алакольского бассейна. Алматы: Институт географии. 2017. 109 с. URL: <https://ingeo.kz/?p=6417> (дата обращения: 02.02.2026).
12. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
13. Li M., Cao S., Zhu Z. et al. Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022. *Earth System Science Data*. 2023. V. 15. No. 9. Pp. 4181-4203. DOI: 10.5194/essd-15-4181-2023.
14. Ramesh K., Arivudai Nambi A., Ramya R. et al. Evaluation of SPI and Rainfall Departure Based on Multi-Satellite Precipitation Products for Meteorological Drought Monitoring in Tamil Nadu. *Water*. 2023. V. 15. No. 7. Article 1435. 25 p. DOI: 10.3390/w15071435.
15. Всемирная метеорологическая организация. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. URL: <https://space.oscar.wmo.int/> (дата обращения: 12.01.2026).
16. Gao W., Zhao F., Xu Y., Feng X. Validation of the Surface Air Temperature Products Retrieved from the Atmospheric Infrared Sounder Over China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 6. Pp. 1783-1789. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916640.
17. Behrangi A., Fetzner E.J., Granger S. Early detection of drought onset using near surface temperature and humidity observed from space. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. V. 37. No. 16. Pp. 3911-3923. DOI: 10.1080/01431161.2016.1204478.
18. Miralles D.G., Bonte O., Koppa A. et al. GLEAM4: global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. *Scientific Data*. 2025. V. 12. Article 416. 14 p. DOI: 10.1038/s41597-025-04610-y.
19. Mladenova I.E., Bolten J.D., Crow W. et al. Agricultural Drought Monitoring via the Assimilation of SMAP Soil Moisture Retrievals into a Global Soil Water Balance Model. *Frontiers in Big Data*. 2020. V. 3. Article 10. 16 p. DOI: 10.3389/fdata.2020.00010.
20. Zhu L., Tian G., Wu H. et al. Moisture Product and its Application in Agriculture. *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 7. Article 1225. DOI: 10.3390/rs16071225.
21. Jiang Z., Pan M., Wang T. et al. Seamless global daily soil moisture mapping using deep learning based spatiotemporal fusion. *Environmental Modelling & Software*. 2025. V. 172. Article 105950. 13 p. DOI: 10.1016/j.envsoft.2024.105950.
22. Щербенко Е.В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. №2. С. 408-419.
23. Li J., Ma R., Cao Z., Zhu Z. et al. Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology. *Water*. 2022. V. 14. Article 1148. 18 p. DOI: 10.3390/w14071148.
24. Zhang F.F., Li J.S., Wang C. et al. Multitype inland water atmospheric correction and water quality estimation based on HY-1C CZI images. *National Remote Sensing Bulletin*. 2023. V. 27. No. 1. Pp. 79-91. DOI: 10.11834/jrs.20235010.
25. Jung J., Fattahi H., Jeong S. et al. Towards Global Mapping of Dynamic Surface Water Extents Using Sentinel-1 SAR Data: Preprint. SSRN. 2025. 36 p. DOI: 10.2139/ssrn.5134349.
26. Gascoin S., Grizonnet M., Bouchet M. et al. Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*. 2019. V. 11. Pp. 493-514. DOI: 10.5194/essd-11-493-2019.
27. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*. 1995. V. 15. No. 11. Pp. 91-100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
28. Descals A., Torres K., Verger A., Penuelas J. Evaluating Sentinel-2 for Monitoring Drought-Induced Crop Failure in Winter Cereals. *Remote Sensing*. 2025. V. 17. Article 340. DOI: 10.3390/rs17020340.

References

1. Svoboda M., Fuchs B. *Spravochnik po pokazatelyam i indeksam zasushlivosti VMO* [WMO Handbook of Drought Indicators and Indices]. Geneva: World Meteorological Organization. Integrated Drought Management Programme. 2016. 60 p.
2. Mullapudi A., Vibhute A.D., Mali S. et al. A review of agricultural drought assessment with remote sensing data: methods, issues, challenges and opportunities. *Applied Geomatics*. 2022. 13 p. DOI: 10.1007/s12518-022-00484-6.
3. Goryshina T.K. *Ekologiya rasteniy: uchebnoye posobiye* [Plant Ecology: A Textbook]. Moscow: Higher School. 1979. 368 p.
4. You Z., Sun X., Sun H. et al. Mechanisms of meteorological drought propagation to agricultural drought in China: insights from causality chain. *Natural Hazards*. 2025. V. 2. No. 1. 15 p. DOI: 10.1038/s44304-025-00073-8.
5. Hong S., Deng H., Zheng Z. et al. The influence of variations in actual evapotranspiration on drought in China's Southeast River basin. *Scientific Reports*. 2023. 13 p. DOI: 10.1038/s41598-023-48663-8.
6. Zheng C., Jia L., Hu G. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations. *Journal of Hydrology*. 2022. V. 613. Part B. 21 p. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128444.
7. Fernandez-Moran R., Al-Yaari A., Mialon A. et al. SMOS-IC: An Alternative SMOS Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Product. *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 5. Article 457. 21 p. DOI: 10.3390/rs9050457.
8. Hulley G.C., Freepartner R., Islam T. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Land Surface Temperature and Emissivity Product (VNP21) User Guide. NASA GSFC. 2023. 37 p. URL: https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/VNP21_LSTE_user_guide.pdf.
9. Vicente-Serrano S.M., Gouveia C., Camarero J.J. et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. V. 110. No. 1. Pp. 52-57. DOI: 10.1073/pnas.1207068110.
10. Adams K.H., Reager J.T., Rosen P. et al. Remote sensing of groundwater: Current capabilities and future directions. *Water Resources Research*. 2022. V. 58. No. 10. 27 p. DOI: 10.1029/2022WR032219.
11. Seversky I.V. *Dinamika gornoy kriosfery Balkash-Alakol'skogo basseyina* [Dynamics of the mountain cryosphere of the Balkhash-Alakol basin]. Almaty: Institute of Geography. 2017. 109 p. URL: <https://ingeo.kz/?p=6417> (date of access: 02.02.2026).
12. Sereda I.I., Denisov P.V., Troshko K.A. et al. Unique conditions for winter crop development observed using satellite monitoring data in the European territory of Russia in October 2020. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. No. 5. Pp. 304-310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
13. Li M., Cao S., Zhu Z. et al. Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022. *Earth System Science Data*. 2023. V. 15. No. 9. Pp. 4181-4203. DOI: 10.5194/essd-15-4181-2023.
14. Ramesh K., Arivudai Nambi A., Ramya R. et al. Evaluation of SPI and Rainfall Departure Based on Multi-Satellite Precipitation Products for Meteorological Drought Monitoring in Tamil Nadu. *Water*. 2023. V. 15. No. 7. Article 1435. 25 p. DOI: 10.3390/w15071435.
15. World Meteorological Organization. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. URL: <https://space.oscar.wmo.int/> (date of access: 12.01.2026).
16. Gao W., Zhao F., Xu Y., Feng X. Validation of the Surface Air Temperature Products Retrieved from the Atmospheric Infrared Sounder Over China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 6. Pp. 1783-1789. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916640.
17. Behrangi A., Fetzer E.J., Granger S. Early detection of drought onset using near surface temperature and humidity observed from space. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. V. 37. No. 16. Pp. 3911-3923. DOI: 10.1080/01431161.2016.1204478.
18. Miralles D.G., Bonte O., Koppa A. et al. GLEAM4: global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. *Scientific Data*. 2025. V. 12. Article 416. 14 p. DOI: 10.1038/s41597-025-04610-y.
19. Mladenova I.E., Bolten J.D., Crow W. et al. Agricultural Drought Monitoring via the Assimilation of SMAP Soil Moisture Retrievals into a Global Soil Water Balance Model. *Frontiers in Big Data*. 2020. V. 3. Article 10. 16 p. DOI: 10.3389/fdata.2020.00010.
20. Zhu L., Tian G., Wu H. et al. Moisture Product and its Application in Agriculture. *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 7. Article 1225. DOI: 10.3390/rs16071225.
21. Jiang Z., Pan M., Wang T. et al. Seamless global daily soil moisture mapping using deep learning based spatiotemporal fusion. *Environmental Modelling & Software*. 2025. V. 172. Article 105950. 13 p. DOI: 10.1016/j.envsoft.2024.105950.
22. Shcherbenko E.V. Remote methods for detecting agricultural drought. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2007. V. 4. No. 2. Pp. 408-419.
23. Li J., Ma R., Cao Z., Zhu Z. et al. Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology. *Water*. 2022. V. 14. Article 1148. 18 p. DOI: 10.3390/w14071148.
24. Zhang F.F., Li J.S., Wang C. et al. Multitype inland water atmospheric correction and water quality estimation based on HY-1C CZI images. *National Remote Sensing Bulletin*. 2023. V. 27. No. 1. Pp. 79-91. DOI: 10.11834/jrs.20235010.
25. Jung J., Fattahi H., Jeong S. et al. Towards Global Mapping of Dynamic Surface Water Extents Using Sentinel-1 SAR Data: Preprint. SSRN. 2025. 36 p. DOI: 10.2139/ssrn.5134349.
26. Gascoin S., Grizonnet M., Bouchet M. et al. Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*. 2019. V. 11. Pp. 493-514. DOI: 10.5194/essd-11-493-2019.
27. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*. 1995. V. 15. No. 11. Pp. 91-100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
28. Descals A., Torres K., Verger A., Penuelas J. Evaluating Sentinel-2 for Monitoring Drought-Induced Crop Failure in Winter Cereals. *Remote Sensing*. 2025. V. 17. Article 340. DOI: 10.3390/rs17020340.

**Сведения об авторах
Принадлежность к организации**

Чумарев Иван Сергеевич

соискатель, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Беленко Виктор Владимирович

доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

**Information about authors
Affiliations**

Chumarev Ivan Sergeevich

Applicant, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Belenko Viktor Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 18.05.2026 г.