

## 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@vifanc.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 “Vegetation Science”. Площади выявленных по данным ДЗЗ полей сопоставимы с данными официальной статистики. Поля располагаются на землях с крутизной до 5°, преобладает крутизна 1–2° (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 крутизной 1–2°, 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 ГИС-технологиями 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 культу-

ры, 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.

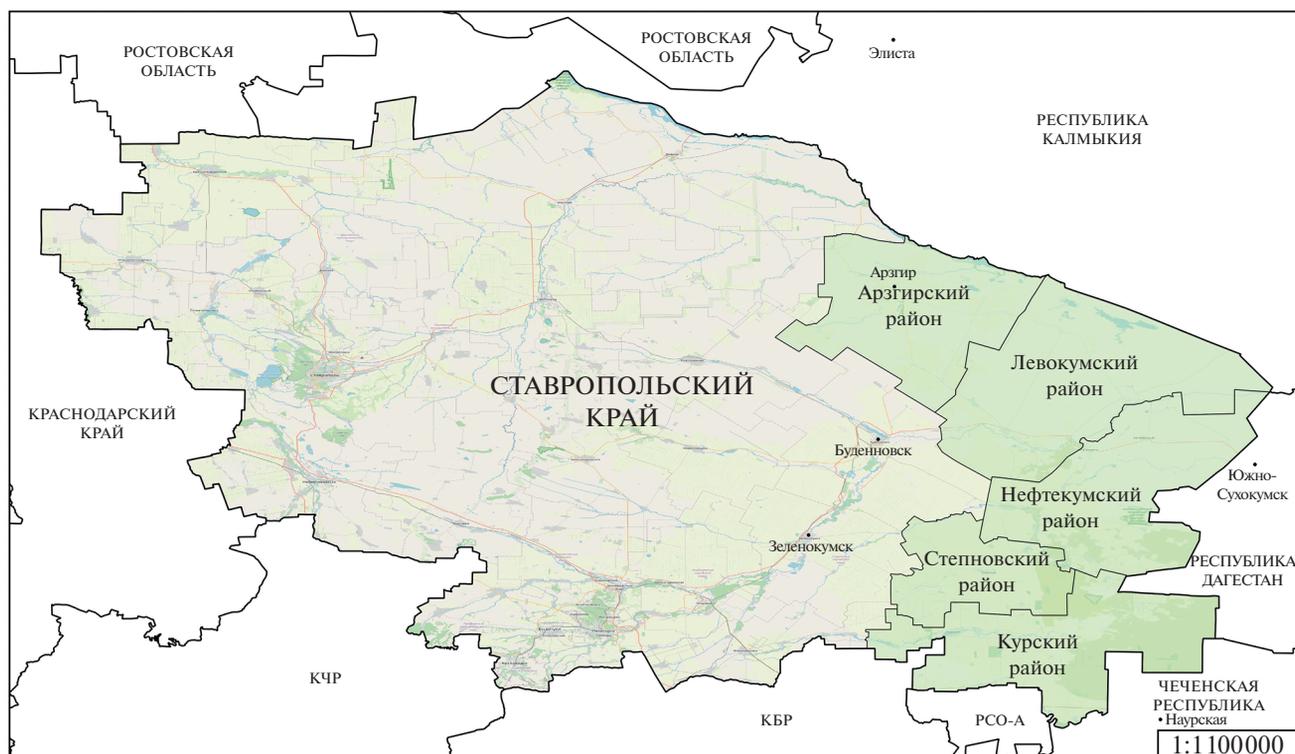


Рис. 1. Область исследования.

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, Степановского (рис. 1). Данная область на севере и востоке граничит с Республиками Калмыкия и Дагестан, имеющими 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 Степановского районов – в засушливом районе (Антонов, 2018).

Арзгирский и Степановский муниципальные районы имеют растениеводческую сельскохозяйственную специализацию. Левокумский, Нефтекумский и Курский районы в западной части яв-

ляются 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). Среднегодовое 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 изоб-

ражения 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 “VEGA-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 приходится на период с апреля по май. Сервис “Vega-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 определенном периоде 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 мультитременной 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 “VEGA-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 осадков 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

**Таблица 1.** Распределение полей и озимых культур в муниципальных районах по состоянию на 2021 год

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

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.

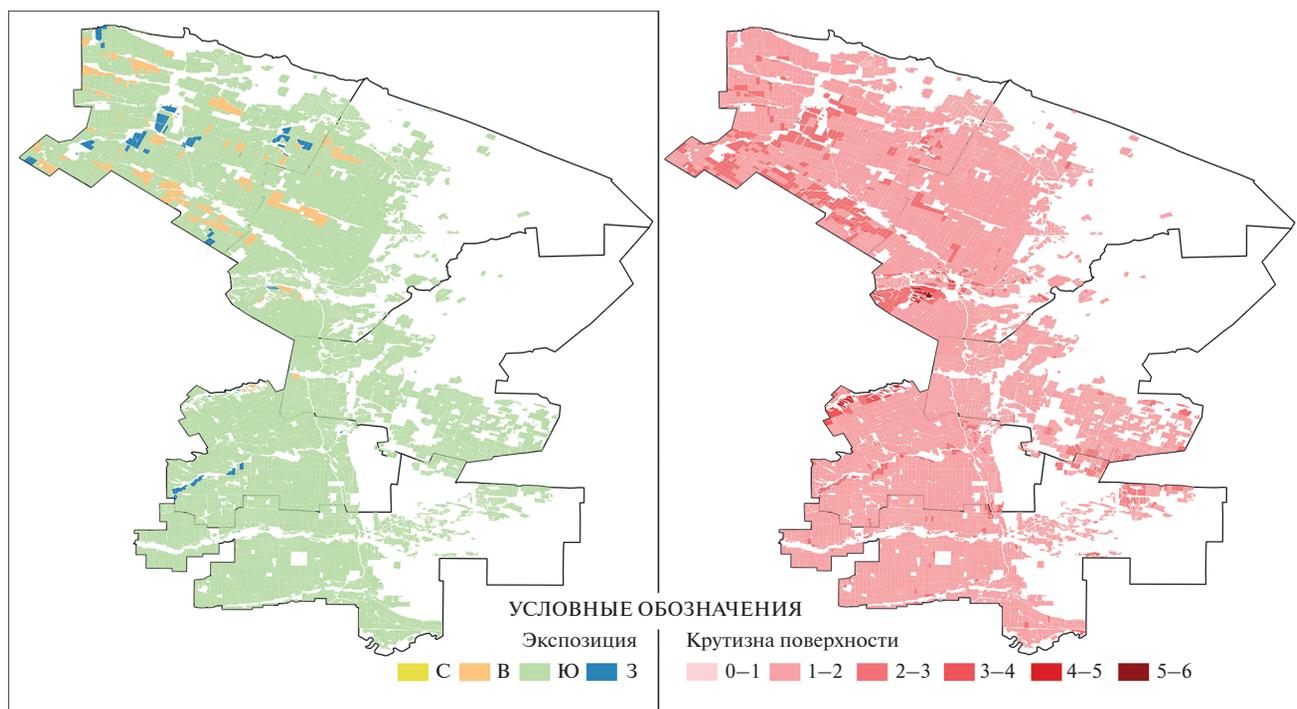
На основании полученных с помощью цифровой модели рельефа морфометрических характеристик была создана схема распределения полей по крутизне поверхности и экспозиции (рис. 2). Для наглядности отображения ориентации полей по сторонам света выделено 4 румба.

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).

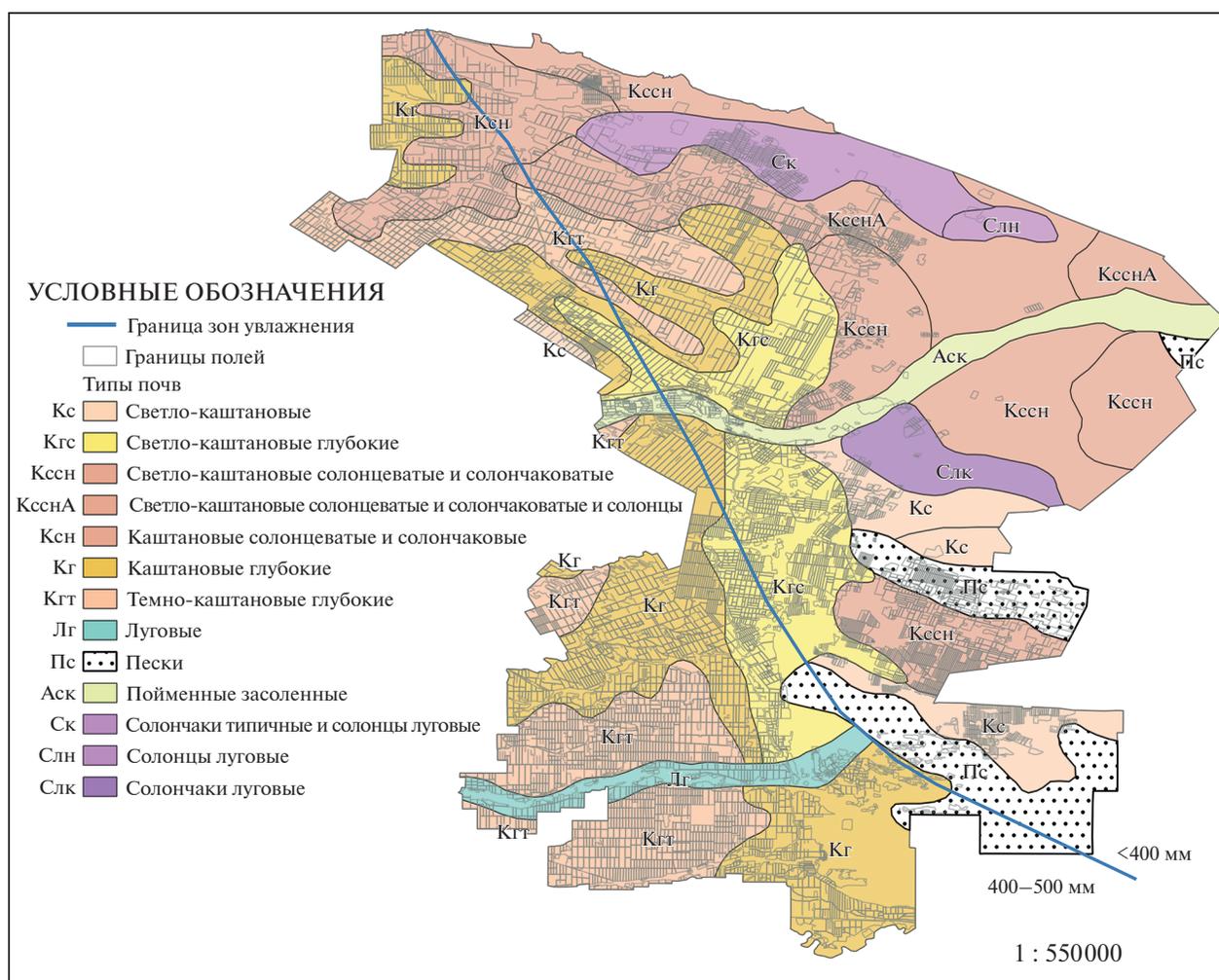
**Таблица 2.** Распределение площадей полей по пространственной ориентации и крутизне уклонов

Экспозиция	Крутизна						Σ (га)
	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	
В	–	18806.6	13719.4	987.4	199.4	–	33712.8
Ю	539.7	746983.5	60790.8	3385.3	1285.3	208.3	813192.9
З	–	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

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”, показаны



**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 ДЗ3 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 ДЗ3, разрыв в указанные годы составляет менее 20 тыс. га. Малая ошибка определения площадей по данным ДЗ3 (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).

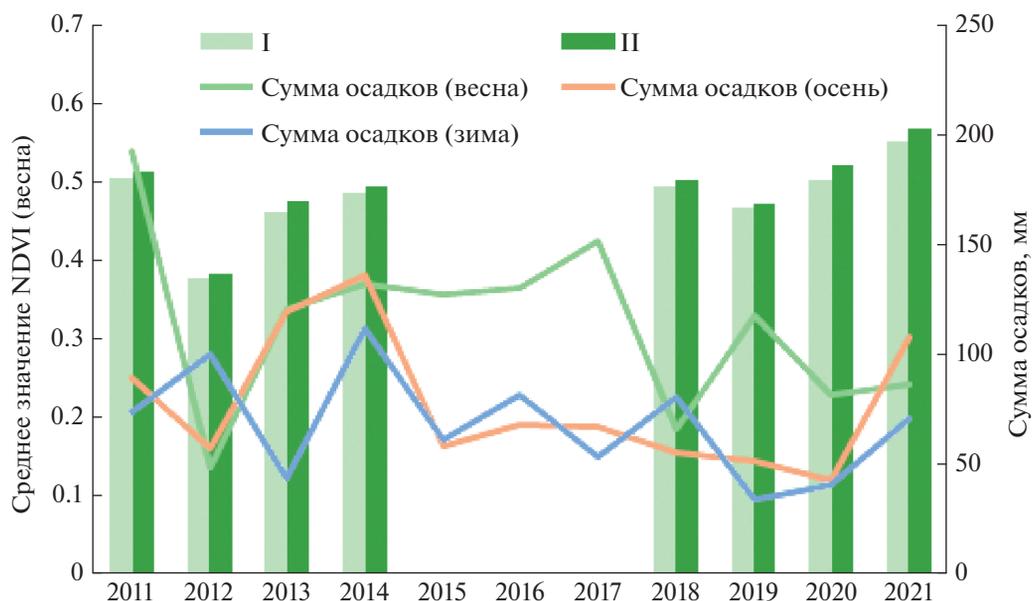
Средние значения NDVI за весенний период (с марта по май) были рассчитаны с использованием композитных изображений, учитывающих средние показатели индекса для каждого пикселя и поля. При анализе таких значений в комплексе с данными о количестве осадков необходимо учи-

тывать, что сумма зимних и осенних осадков (сентябрь–февраль) оказывает непосредственное влияние на произрастание озимых культур весной следующего года (Денисов и др., 2021; Серeda 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

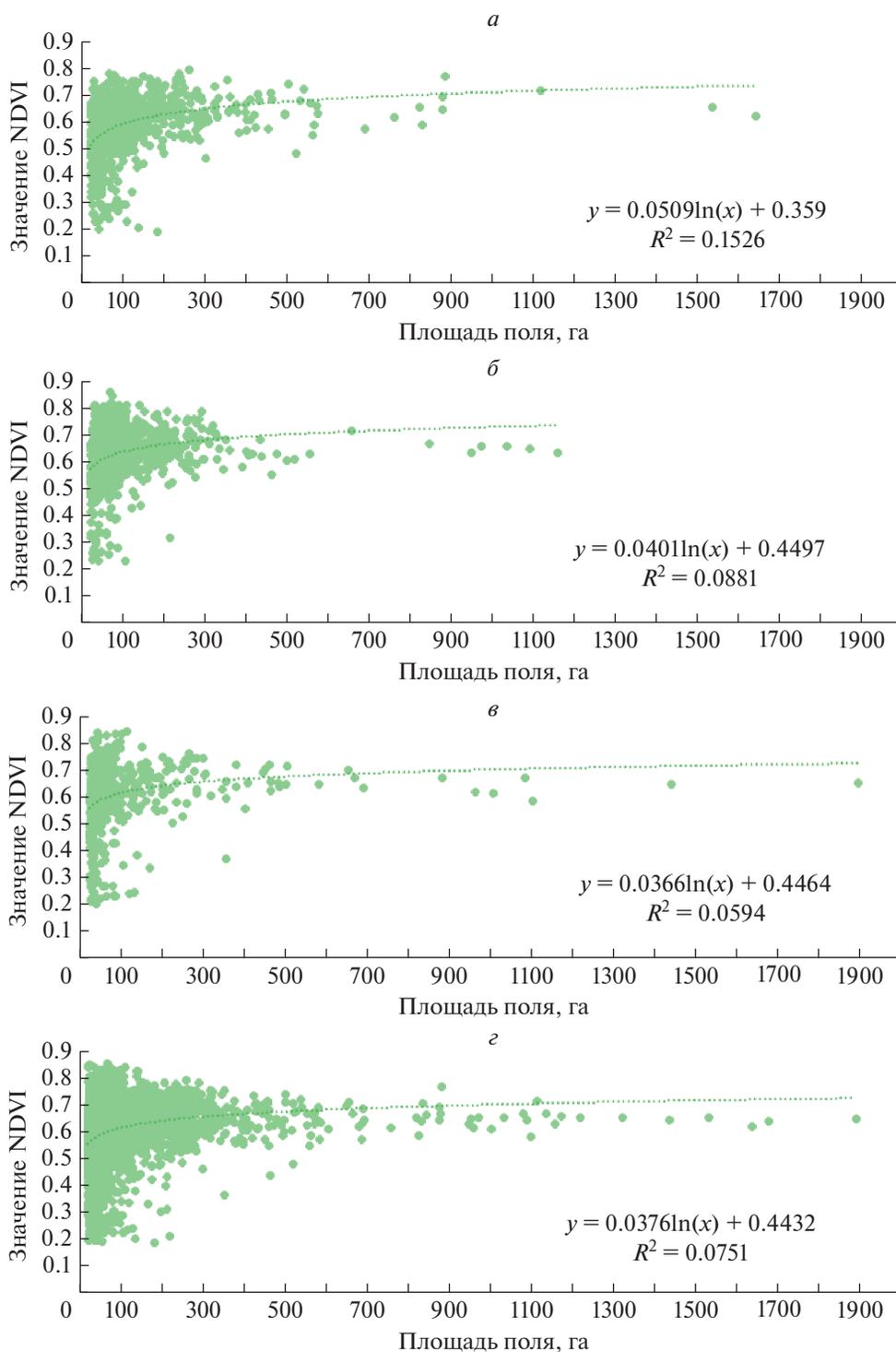


**Рис. 5.** График соотношения средних весенних значений NDVI и количества осадков (I — зона с годовой суммой осадков <400 мм; II — зона с годовой суммой осадков 400–500 мм).

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), исключая влияние сдвига сезона путем нормировки оценки состояния озимых культур на накопленную температуру, развитие посевов в течение весенних перио-

дов 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 большой 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, качества 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 (*а* – средний NDVI озимых на светло-каштановых глубоких почвах, *б* – средний NDVI озимых на темно-каштановых глубоких почвах, *в* – средний NDVI озимых на каштановых глубоких почвах, *г* – 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 площа-

дью 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 площадью 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 темно-каштановых 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-

**Таблица 4.** Распределение полей и среднего NDVI по экспозиции склонов

Экспозиция	Площадь полей, тыс. га	Средняя площадь поля, га	Средний NDVI
45°–90° ВСВ	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° ЗСЗ	0.05	23.4	0.49

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 среднеего-летнего 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°–225°), они составляют почти 90% от общей площади полей и имеют самые высокие показатели NDVI за весенний период. Поля с северной экспозицией (315°–345°) в зоне исследования отсутствуют, а также наименьшим количеством объектов представлены объекты с экспозицией западо-северо-запад (270°–315°), 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. Кура. В этой области конфигурация полей значительно зависит от рельефа местности.

Отклонение от среднеего-летнего весеннего значения NDVI (0.49) для всех румбов находится в пределах 10%. Совпадение среднего значения NDVI для полей с западо-северо-западной экспозицией со среднеего-голетним 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 среднеего-голетний весенний NDVI озимых культур выше на большинстве типов почв. При этом такое влияние может считаться незначительным. Выявлено, что повышение среднеего-голетних 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. Исползованная 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., Серeda 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-исследо-

вательский институт РАСХН. 2021. С. 51–55. EDN WCIJTY.

*Луян Е.А., Серeda 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.

*Серeda 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 AWYDOQ.

*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 // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 3. С. 221–228.

*Трошко К.А., Денисов П.В., Луян 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 VJXOUW.

*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., Бальнова 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: АСТ. 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

### REFERENCES

Antonov S.A. Izmenenie agroklimaticheskogo rajonirovaniya territorii Stavropol'skogo kraja 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. № 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 ozimoy 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 Rus-

sian).  
<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. № 2. P. 171–185. (In Russian).  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185>  
EDN CVLTGO.

- Denisova E.V.* Primenenie sovremennykh 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 oroshaemykh 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 zernovykh 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 dannykh 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 kraja [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 sezonnyu dinamiku vegetacionnogo indeksa NDVI posevnykh ploshchadej [The influence of slope exposure on the seasonal dynamics of the vegetation index NDVI of acreage] // Izvestiya Nizhnevolskogo 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 RPZVDY.
- Sinel'nikova K.P.* Prostranstvennyj analiz degradacii agrolandshaftov Donskoj gryady [Spatial analysis of degradation of agricultural landscapes of the Don ridge] // Nauchno-agronomicheskij 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 ozimoi pshenicy v Stavropol'skom krae [The use of NDVI to assess the productivity of winter wheat in the Stavropol Territory] // Zemledelie. 2014. № 7. P. 12–15. EDN RCQQIN. (In Russian).
- Testlenok K.S., Mushtajkin A.P., Testlenok S.A.* Izuchenie osobennostej sel'skohozyajstvennykh ugodij s ispol'zovaniem cifrovyykh 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 zernovykh 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 KJNBFS.
- Troshko K.A., Denisov P.V., Dunaeva E.A. i dr.* Osobennosti razvitiya ozimyh sel'skohozyajstvennykh 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.