

## Пространственно-временной анализ влажности почв сельскохозяйственных полей

© 2023. Д. С. Фомин<sup>1</sup>, к. с-х. н., зав. лабораторией,  
А. Н. Чашчин<sup>2</sup>, к. б. н., доцент,

<sup>1</sup>Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук,  
614990, Россия, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13,

<sup>2</sup>Пермский государственный аграрно-технологический университет  
имени академика Д. Н. Прянишникова,  
614990, Россия, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 23,  
e-mail: chascshin@mail.ru

Проведены исследования пространственно-временной изменчивости полевой влажности почв трёх опытных полей ПФИЦ УрО РАН, расположенных в Пермском районе Пермского края (с. Лобаново). Условия опыта – чистый пар. Полевую влажность почв измеряли по точкам, расставленным с учётом неоднородности почвенного покрова и условий рельефа. На основе выполненных измерений созданы карты полевой влажности почв геостатистическим методом Ordinary Kriging. На основе полученных геостатистических слоёв была установлена взаимосвязь влажности со спутниковыми данными Sentinel 2 через спектральный индекс NDVI. Характер зависимости оказался изменчив во времени. В начале вегетационного периода зависимость является обратной, что подтверждает индикационную роль NDVI при выявлении переувлажнённых участков, но, начиная с третьей декады мая, связь становится положительной. Это объясняется тем, что обработка чистых паров производится не ежедневно и на участках, имеющих наибольшее увлажнение, раньше появляются всходы. Поэтому в течение вегетационного периода полевая влажность через NDVI идентифицируется косвенно – по величине биомассы растений. Для отдельных дат измерений установлена тесная корреляционная связь растровых карт NDVI и полевой влажности ( $r = 0,86$ ). Полученная зависимость может применяться при прогнозировании влажности почв аналогичных территорий. Результаты исследований будут использованы для дифференцированного посева семян с учётом различных условий увлажнения в пределах опытных полей.

**Ключевые слова:** полевая влажность почвы, ординарный кригинг, вегетационный индекс NDVI, точное земледелие.

## Spatio-temporal analysis of soil moisture in the experimental agricultural fields

© 2023. D. S. Fomin<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8261-7191<sup>?</sup>

A. N. Chashchin<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6349-3055<sup>?</sup>

<sup>1</sup>Perm Federal Research Center of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
13, Lenina St., Perm, Russia, 614990,

<sup>2</sup>Perm State Agro-Technological University  
named after Academician D. N. Pryanishnikov,  
23, Petropavlovskaya St., Perm, Russia, 614990,  
e-mail: chascshin@mail.ru

Studies of the spatial-temporal variability of the field soil moisture content of three experimental fields located in the Perm district of the Perm region were carried out. The experimental conditions were pure fallow. The purpose of the work is to perform a spatio-temporal analysis of soil moisture in experimental fields using mathematical-cartographic and remote sensing methods. Field soil moisture was measured by points placed taking into account the heterogeneity of the soil cover and topography conditions. Based on the measurements performed, maps of field soil moisture were created using the “Ordinary Kriging” geostatistical method, using the Geostatistical Analyst module of the ArcGIS 10.1 program. The assessment of the influence of the relief on the moisture was performed using the SRTM global digital elevation model. Indicators calculated were topographic humidity index and closed depressions. Based on the obtained geostatistical layers, the relationship between humidity and Sentinel 2 satellite data was established through the spectral index NDVI. For the initial and final dates of measurements, correlation coefficients 0.8 and 0.9 were obtained. The nature of dependence turned out to be changeable over

time. At the beginning of the growing season, the relationship is inverse, which confirms the indicator role of NDVI in moist areas, but starting from the third decade of May, the relationship becomes positive. This is due to the fact that the treatment of soils is not done every day, and seedlings appear earlier in the areas with the greatest moisture. Therefore, during the growing season, the field moisture content through the NDVI is indirectly identified by the value of the plant biomass. For individual measurement dates, a close correlation was established between NDVI raster maps and field humidity ( $r = 0.86$ ). The resulting dependence can be used to predict soil moisture in similar areas. The results of the research will be used for differentiated sowing of seeds, taking into account different moisture conditions within the experimental fields.

**Keywords:** soil moisture, Ordinary Kriging, Normalized Difference Vegetation Index, precision farming.

Влажность почвы служит одним из основных параметров в системе точного земледелия. Этот показатель применяется для определения оптимальных условий роста на различных участках поля, прогнозирования урожайности и определения проблемных зон, обусловленных рельефом. Полевая влажность почвы является динамическим показателем и зависит от ряда факторов, имеющих пространственную неоднородность [1–3]. Пространственная неоднородность почвенной влажности значительно усиливается в условиях сложного рельефа и пестроты почвенного покрова Пермского края. Поэтому даже на небольших площадях опытных полей влажность почвы может варьировать в значимом диапазоне. Результаты исследований пространственно-временной динамики полевой влажности преобладающих типов почв южно-таёжной подзоны региона позволяют создать геодинамическую модель прогноза значимых для растениеводства показателей: наступление срока физической спелости почвы, риски гибели посевов от избыточного переувлажнения или засух, что определяет актуальность выполненных исследований. При этом прогноз осуществляется на конкретную дату, поскольку в основе моделей используются данные дистанционного зондирования, которые чётко отражают процессы перемещения воды в поверхностном слое открытых почв [4]. На свободной от растительности земной поверхности это показатель полевой влажности, который, согласно данным [5, 6], является значимым экологическим параметром почв. Угодьями с открытой поверхностью почв в течение всего вегетационного периода являются чистые пары. В связи с этим исследования проведены на чистых парах опытных полей ПФИЦ УрО РАН.

Цель работы – выполнить пространственно-временной анализ влажности почв опытных полей с использованием математико-картографических и дистанционных методов.

### Объекты и методы исследований

Объектом исследований является почвенный покров трёх опытных полей ПФИЦ УрО

РАН, расположенных в с. Лобаново Пермского района Пермского края (рис. 1).

Несмотря на близкое расположение, почвенный покров полей значительно отличается. Также различны условия рельефа, что определяет различные условия увлажнения. Общая площадь исследований составляет 26,7 га (поле 1 – 10,8; поле 2 – 12,5; поле 3 – 3,4 га). Места заложения участков измерений полевой влажности почв выбраны на различных почвенных контурах и элементах рельефа. Почвенный покров поля 1 является наиболее разнообразным. Преобладающая почва – дерново-слабоподзолистая среднесмытая (60% от площади). На поле заложено 11 точек: 2 – на дерново-бурой почве, 5 и 3 – на дерново-подзолистой средне- и слабосмытой соответственно. Почвенный покров второго поля охватывает две почвенные разности: дерновую среднегумусную (65% от площади) и дерново-мелкоподзолистую (35% от площади). Всего заложено 7 точек: 3 – на дерновой почве и 4 – на дерново-подзолистой. Почвенный покров третьего поля представлен только одной почвенной разностью – дерново-мелкоподзолистой. Поэтому выбор местоположения точек измерения полевой влажности выполнен с учётом рельефа. Всего на поле выбрано 10 точек. Таким образом, пространственно-временной анализ влажности почв выполнен на основе 28 точек измерений на трёх полях с разной контрастностью почвенного покрова и формами рельефа, при этом типы почв являются наиболее характерными для южно-таёжной подзоны Пермского края.

Полевую влажность почв [7] измеряли в трёхкратной повторности прибором «Измеритель влажности почвы «Moisture Meter НН2». В связи с неблагоприятными метеоусловиями (облачность и избыточное количество осадков) измерения удалось провести только по датам: 19 апреля, 11 мая, 5 июня, 18 июля 2019 г. Масштаб съёмки детальный – 1 : 5000. Предварительный анализ данных полевой влажности и интерполяция методом Ordinary Kriging проведены средствами модуля Geostatistical Analyst программы ArcGIS 10.1 [8]. Создание

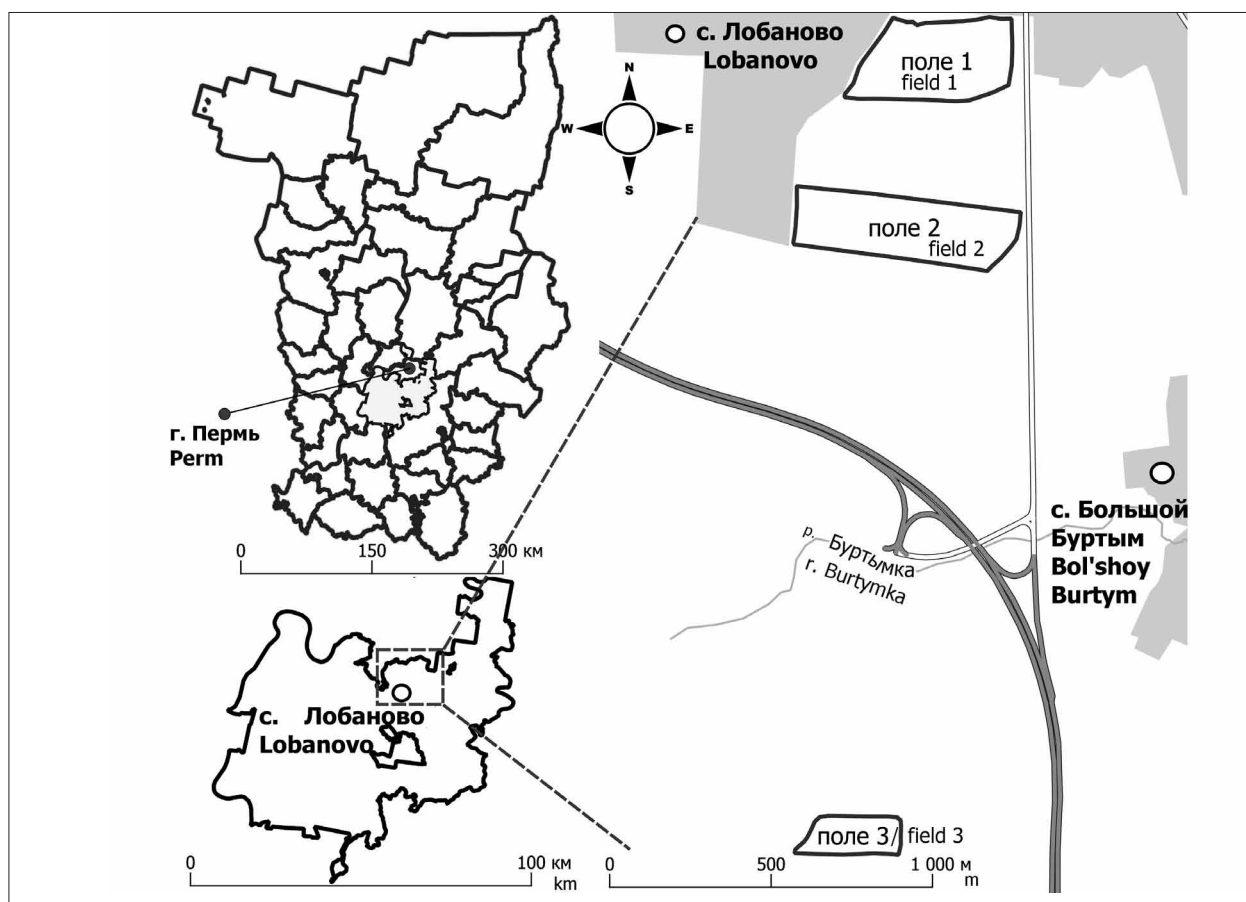


Рис. 1. Расположение опытных полей на территории Пермского края  
 Fig. 1. Location of experimental fields in the Perm region

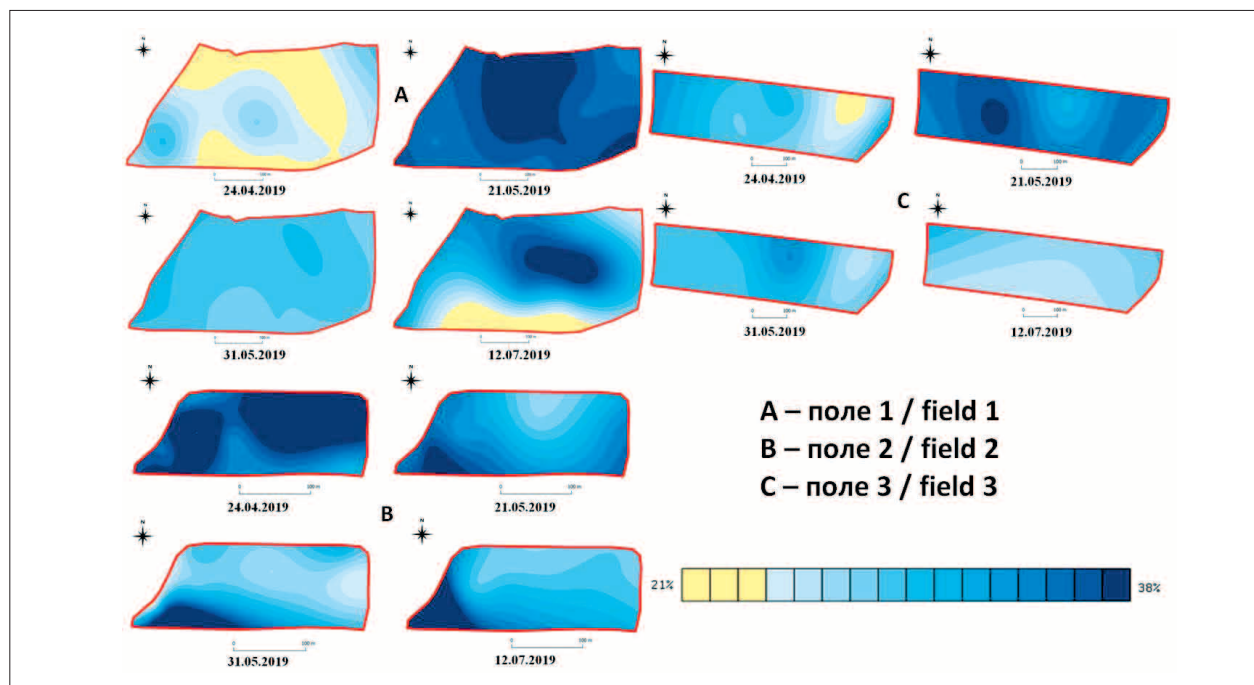
картографических материалов и обработку спутниковых снимков выполняли в программном продукте QGIS. В качестве данных дистанционного зондирования использовали мультиспектральные снимки сенсора Sentinel 2 с пространственным разрешением 10 м на пиксель. Оценка влияния рельефа на полевую влажность выполнена при помощи глобальной цифровой модели рельефа SRTM. Рассчитаны показатели: топографический индекс влажности и замкнутые понижения. Для создания прогнозных моделей оценки влагообеспеченности почв и растений использовали спектральный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [9, 10].

### Результаты и обсуждение

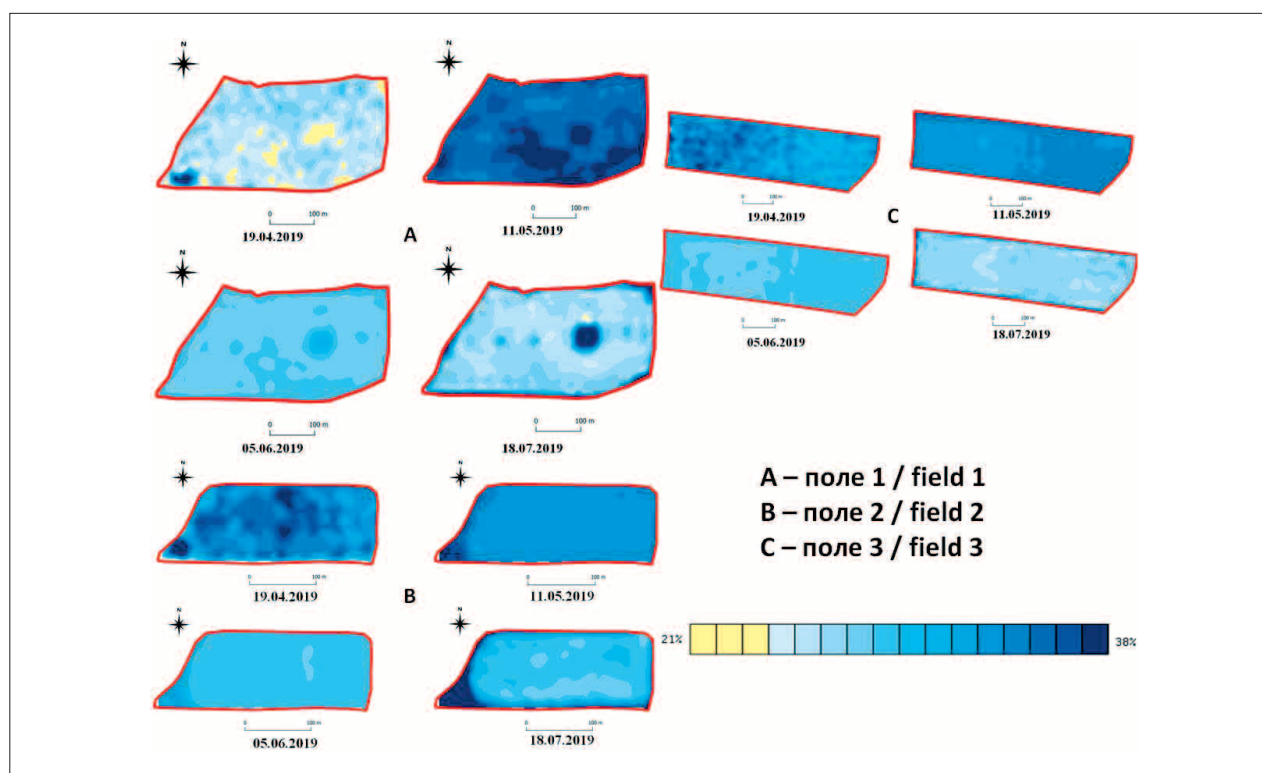
В результате исследования данных о влажности почвы трёх опытных полей подобраны оптимальные параметры интерполяции методом Ordinary Kriging. Результаты картографирования показаны на рисунке 2 (см. цв. вкладку VI). Математико-картографическое моделирование полевой влажности на поле 1

позволило выявить участки, наиболее быстро просыхающие после схода снежного покрова (24 апреля). В дальнейшем рост поверхностного увлажнения к 21 мая вызван атмосферными осадками. Ареалы повышенных значений топографического индекса влажности имеют совпадения с полевой влажностью только 21 мая. На поле 2 динамика полевой влажности аналогична – происходит увлечение поверхностного увлажнения к 21 мая и снижение – 12 июля. Колебания полевой влажности в вегетационный период обусловлены атмосферными осадками. Области высоких значений топографического индекса влажности и замкнутых понижений соответствуют полевой влажности почвы 21 апреля, что свидетельствует о значительном влиянии рельефа на динамику поверхностного увлажнения почвы от талых вод. По результатам пространственной интерполяции влажности почвы на третьем поле выделена область максимального переувлажнения в юго-западной части, где на каждую дату наблюдений видны наибольшие значения. При этом в среднем динамика влажности поля в пространстве

**Д. С. Фомин, А. Н. Чашин**  
**«Пространственно-временной анализ влажности почв**  
**сельскохозяйственных полей». С. 113.**



**Рис. 2.** Полевая влажность почвы на полях  
**Fig. 2.** Soil moisture in the fields



**Рис. 4.** Пространственно-временная модель влажности почв полей  
**Fig. 4.** Spatio-temporal model of soil moisture in the fields

и времени свидетельствует об увеличении влажности от севера к югу участка.

Отражение открытой почвы в условиях чистого пара фиксируют спутниковые снимки. По данным таблицы 1 наибольшее влияние влажность почвы оказывает на индекс NDVI. Выявленная взаимосвязь была использована для моделирования и пространственно-временного анализа полевой влажности почв опытных полей. Характер зависимости оказался изменчив во времени (табл. 1). В начале вегетационного периода зависимость является обратной, что подтверждает индикационную роль NDVI при выявлении переувлажнённых участков, поскольку данный вегетационный индекс имеет для воды отрицательные значения и по данным [11] находится в диапазоне от -1 до 0. Но начиная с третьей декады мая, связь становится положительной. Это объясняется тем, что обработка чистых паров производится не ежедневно и на участках, имеющих

наибольшее увлажнение, раньше появляются всходы растений. Поэтому в течение вегетационного периода полевая влажность через NDVI идентифицируется косвенно – по уровню вегетации.

Даты измерения полевой влажности и получения данных дистанционного зондирования имеют определённые различия. Периодичность съёмки сенсора Sentinel 2 в средних широтах северного полушария составляет 1 раз в 2–3 суток [12]. Однако вегетационный период 2019 г. характеризовался аномально низким числом безоблачных дней, что значительно ограничило количество снимков. Поэтому интервал полевых измерений и отображения спектральной отражательной способности почвы колеблется от 5 до 10 дней. Даты данных – наземные измерения (космические снимки) были следующие: 24.04.2019 (19.04.2019); 21.05.2019 (11.05.2019); 31.05.2019 (05.06.2019); 12.07.2019 (18.07.2019).

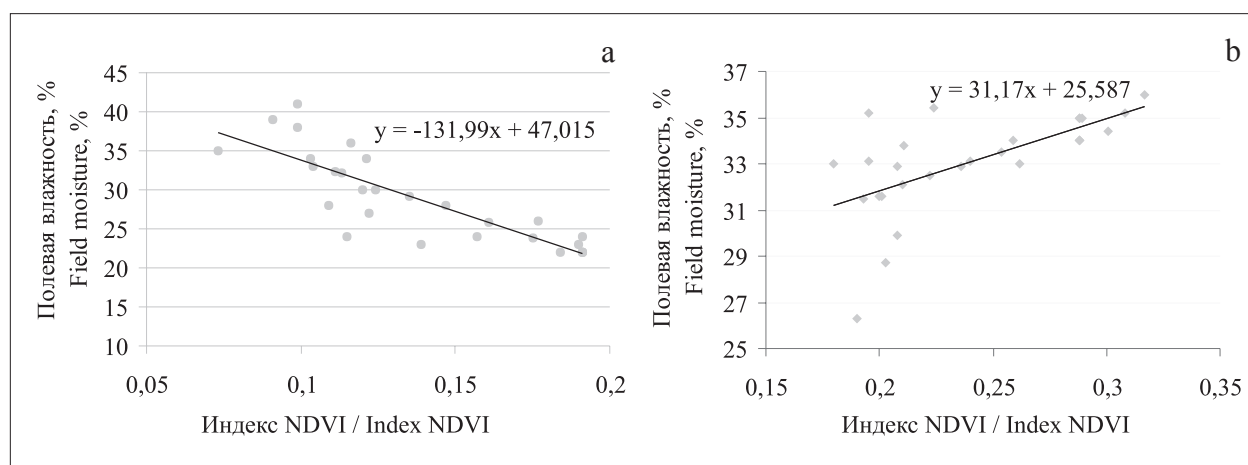


Рис. 3. Графики зависимости значений NDVI от величины полевой влажности 24 апреля 2019 (a) и 21 мая 2019 (b)

Fig. 3. Graphs of NDVI versus humidity on 04.24.2019 (a) and 05.21.2019 (b)

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты корреляции между полевой влажностью почвы и показателями дистанционного зондирования Земли / Correlation coefficients of soil moisture and ERS indicators

Показатель / Parameter		Даты полевых измерений / Dates of field measurements			
		24.04.2019	21.05.2019	31.05.2019	12.07.2019
NDVI		-0,8	0,6	0,4	0,9
Каналы сенсора Sentinel-2 Sentinel-2 bands	NIR	-0,1	0,2	0,2	0,1
	RED	0,0	0,1	-0,1	0,1
	GREEN	0,2	0,1	0,1	0,1
	BLUE	0,1	-0,1	0,1	0,2
Результаты переклассификации данных ЦМР DEM reclassification	TWI	0,1	0,1	0,3	-0,1
	closed depressions	0,1	0,1	0,2	-0,1

Примечания: TWI – топографический индекс влажности; closed depressions – закрытые понижения.  
Note: TWI – topographic moisture index; closed depressions – drainless depressions.

Таблица 2 / Table 2

Уравнения регрессионных зависимостей полевой влажности ( $y$ ) и NDVI ( $x$ )  
Regression equations describing the relationship between field moisture ( $y$ ) and NDVI ( $x$ )

Дата Date	Уравнение связи Relationship equation	Коэффициент детерминации, $R^2$ Determination coefficient, $R^2$
24.04.2019	$y = -131,9x + 47,01$	0,703
12.07.2019	$y = 57,05x + 11,93$	0,892

Для описания зависимости NDVI от полевой влажности были построены графики зависимости значений NDVI от полевой влажности (рис. 3).

По мере увеличения полевой влажности в начале периода наблюдений значения NDVI располагаются более рассеянно на графиках, а с наступлением вегетационного периода, при смене зависимости с обратной на прямую, значения NDVI располагаются более компактно вокруг линии регрессии.

Из таблицы 2 видно, что наибольшим коэффициентом детерминации характеризуется уравнение на дату 12 июля. Рассчитанные уравнения связи использованы для создания прогнозных моделей полевой влажности почвы.

Результаты пространственно-временного моделирования представлены в виде картосхем полевой влажности (рис. 4, см. цв. вкладку VI). На первом поле области переувлажнения в апреле не имеют концентрических очертаний как по результатам полевых измерений, но в целом выделяется переувлажнённый участок в юго-западной части. Участки почв с влажностью менее 25% также имеют схожие местоположения. Динамика полевой влажности поля 2 в целом соответствует общему изменению во времени, однако участки переувлажнённых почв и почв, имеющих влажность до 25%, различны.

Данные расхождения обусловлены началом вегетации, когда при недостаточной сумме температур на переувлажнённых участках всходы вымокают и зависимость NDVI от влажности почвы снижается. Прогноз полевой влажности поля 3 свидетельствует о наибольшем сходстве ( $r = 0,86$ ) с результатами полевых измерений, проведённых 12.07.2019. Это также подтверждает самый высокий коэффициент детерминации уравнения связи. В июльский период температура меньше лимитирует появление всходов на чистом пару и по границам всходов можно установить участки повышенной влажности почвы, что также согласуется с ранее опубликованными результатами исследований [13–20].

## Заключение

Анализ экспериментальных данных, полученных за вегетационный период 2019 г., позволил выявить влияние полевой влажности почвы на NDVI. Для отдельных дат измерений установлена тесная корреляция между влажностью почвы и NDVI посевов ( $r = 0,86$ ). Полученная зависимость может применяться за счёт включения данных в математические модели при прогнозировании влажности почв аналогичных территорий и для дифференцированного посева семян в системе прецизионного земледелия с учётом различных условий увлажнения. По картам влажности может осуществляться корректировка норм высева семян. Дифференцированный посев производится современными сельскохозяйственными машинами (марки сеялок: JohnDeere, Challenger, Monosem, Matter MacWhite, Kinze, Great Plains), управляемыми бортовым компьютером на тракторе. Перед проведением дифференцированного посева карты влажности трансформируются в карты-задания и загружаются в специальное программное обеспечение (например, «Agrar-Office») в формате шейп-файла, содержащего участки с атрибутами рекомендуемых норм высева. На основе этих пространственных данных при работе в поле в соответствии с местоположением, определяемым с помощью навигационной системы, автоматически регулируется количество семян. У дифференцированного посева есть два преимущества – увеличение урожайности и экономия семян. Экологические выгоды увеличения урожайности обусловлены сокращением нагрузки на агроэкосистему за счёт снижения объёмов применения минеральных удобрений и средств защиты растений.

Таким образом, достижение поставленной цели исследований даёт понимание методологии применения данных дистанционного зондирования с учётом сезонных особенностей связи вегетационного индекса и полевой влажности: после весеннего снеготаяния зависимость обратная, а в период активной вегетации сельскохозяйственных культур – прямая.

## Литература

1. Sandholt I., Rasmussen K., Anderson J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of the surface moisture status // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 79. P. 213–224.
2. Trinh L.H. Application of LANDSAT thermal infrared data to study soil moisture using temperature vegetation dryness index // *Vietnam J. Earth Sciences*. 2014. V. 36. No. 3. P. 262–270.
3. Wan Z., Wang P., Li X. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. No. 1. P. 61–72.
4. Зверев А.Т., Чинь Л.Х. Мониторинг влажности почвы по данным многозональной съёмки Landsat // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 6. С. 62–67.
5. Karavani A., De Cáceres M., De Aragón J.M., Bonet J.A., De-Miguel S. Effect of climatic and soil moisture conditions on mushroom productivity and related ecosystem services in Mediterranean pine stands facing climate change // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. V. 248. P. 432–440.
6. Тус О., Song C., Dickschat J.S., Vos M., Garbeva P. The ecological role of volatile and soluble secondary metabolites produced by soil bacteria // *Trends in Microbiology*. 2017. V. 25. No. 4. P. 280–292.
7. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
8. Демьянов В.В. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.
9. Йерена С., Тоаса Г., Курбатова А.И. Соотношение NDVI и альфа-разнообразия в тропических влажных горных лесах Эквадора // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 58–67. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067
10. Chen T., De Jeu R.A.M., Liu Y.Y., van der Werf G.R., Dolman A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 140. P. 330–338.
11. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Использование космических снимков для определения границ водоёмов и изучения процессов эвтрофикации // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 3. С. 28–33.
12. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь: ПГНИУ, 2020. 191 с.
13. Sharma M., Bangotra P., Gautam A.S., Gautam S. Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddh Nagar, UP, India // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2022. V. 36. No. 6. P. 1779–1789.
14. Joiner J., Yoshida Y., Anderson M., Holmes T., Hain C., Reichle R., Zeng F.W. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 219. P. 339–352.
15. Carlson T.N., Perry E.M., Schmugge T.J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1990. V. 52. No. 1–2. P. 45–69.
16. Chauhan N.S., Miller S., Ardanuy P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: A microwave-optical/IR synergistic approach // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. No. 22. P. 4599–4622.
17. Farrar T.J., Nicholson S.E., Lare A.R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture // *Remote Sensing of Environment*. 1994. V. 50. No. 2. P. 124–133.
18. Habiboullah A., Louly M.A. Soil moisture prediction using NDVI and NSMI satellite data: ViT-based models and ConvLSTM-based model // *SN Computer Science*. 2023. V. 4. No. 2. Article No. 140.
19. Lakhankar T. Non-parametric methods for soil moisture retrieval from satellite remote sensing data // *Remote Sensing*. 2009. V. 1. No. 1. P. 3–21.
20. Thanabalan P., Vidhya R., Kankara R.S. Soil moisture estimation using RISAT-1 and SENTINEL-1 data using modified Dubois model in comparison with averaged NDVI // *Geocarto International*. 2022. V. 37. No. 25. P. 8624–8644.

## References

on mushroom productivity and related ecosystem services in Mediterranean pine stands facing climate change // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. V. 248. P. 432–440. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.10.024

6. Tyc O., Song C., Dickschat J.S., Vos M., Garbeva P. The ecological role of volatile and soluble secondary metabolites produced by soil bacteria // *Trends in Microbiology*. 2017. V. 25. No. 4. P. 280–292. doi: 10.1016/j.tim.2016.12.002

7. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods for studying the physical properties of soils. Moskva: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).

8. Demyanov V.V., Saveleva E.A. Geostatistics: theory and practice. Moskva: Nauka, 2010. 327 p. (in Russian).

9. Llerena S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 58–67. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067

10. Chen T., DeJeu R.A.M., Liu Y.Y., van der Werf G.R., Dolman A.J. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 140. P. 330–338. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.022

11. Kutuyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya., Savinykh V.P. The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 28–33 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-028-033

12. Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. Thematic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution. Perm: PGNIU, 2020. 191 p. (in Russian).

13. Sharma M., Bangotra P., Gautam A.S., Gautam S. Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddha Nagar, UP, India // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2022. V. 36. No. 6. P. 1779–1789.

14. Joiner J., Yoshida Y., Anderson M., Holmes T., Hain C., Reichle R., Zeng F.W. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 219. P. 339–352. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.020

15. Carlson T.N., Perry E.M., Schmugge T.J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1990. V. 52. No. 1–2. P. 45–69. doi: 10.1016/0168-1923(90)90100-K

16. Chauhan N.S., Miller S., Ardanuy P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: A microwave-optical/IR synergistic approach // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. No. 22. P. 4599–4622. doi: 10.1080/0143116031000156837

17. Farrar T.J., Nicholson S.E., Lare A.R. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture // *Remote Sensing of Environment*. 1994. V. 50. No. 2. P. 121–133. doi: 10.1016/0034-4257(94)90039-6

18. Habiboullah A., Louly M.A. Soil moisture prediction using NDVI and NSMI satellite data: ViT-based models and ConvLSTM-based model // *SN Computer Science*. 2023. V. 4. No. 2. Article No. 140. doi: 10.1007/s42979-022-01554-7

19. Lakhankar T. Non-parametric methods for soil moisture retrieval from satellite remote sensing data // *Remote Sensing*. 2009. V. 1. No. 1. P. 3–21. doi: 10.3390/rs1010003

20. Thanabalan P., Vidhya R., Kankara R.S. Soil moisture estimation using RISAT-1 and SENTINEL-1 data using modified Dubois model in comparison with averaged NDVI // *Geocarto International*. 2022. V. 37. No. 25. P. 8624–8644. doi: 10.1080/10106049.2021.2003443