

А.Н. Чашин<sup>1</sup>, В.Ю. Гилёв<sup>1</sup>

## ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ПЛОДОРОДНОГО СЛОЯ ТЕХНОГЕННО-НАРУШЕННЫХ ПОЧВ

### АННОТАЦИЯ

Важным показателем плодородия почв является мощность плодородного слоя, которая значительно сокращается при техногенном воздействии и частично восстанавливается при рекультивации. Оперативно оценить мощность плодородного слоя почв нарушенных участков позволяют данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). Цель работы — изучить возможность использования вегетационного индекса NDVI для дистанционной оценки мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных почв. Объект исследований — почвенный покров земель сельскохозяйственного назначения, представленный на 26 земельных участках с общей площадью 3 га. По спутниковым снимкам установлено, что исходное состояние почвенного покрова территории было равномерным. На картограммах NDVI отражена динамика проективного покрытия растениями в пространстве и времени. По NDVI установлено значительное изменение в проективном покрытии по сравнению с первоначальным состоянием территории. Установлено, что размер толщины нанесённого плодородного слоя влияет на скорость развития биомассы травянистых растений. Наиболее тесная достоверная связь NDVI и плодородного слоя почв наблюдается после появления первых всходов на рекультивированной территории. Коэффициенты корреляции NDVI с мощностью плодородного слоя почв равны 0,65 в среднем по участкам и 0,71 в конкретных точках измерения плодородного слоя.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Пермский край, рекультивация почв, данные Landsat, данные Sentinel-2, индекс NDVI

Aleksey N. Chashchin<sup>2</sup>, Vitaliy Yu. Gilev<sup>2</sup>

## POSSIBILITIES OF REMOTE SENSING DATA IN THE ASSESSMENT OF THE THICKNESS OF THE TOP LAYER OF DISTURBED SOIL

### ABSTRACT

An important indicator of soil fertility is the thickness of the fertile layer, which is significantly reduced during anthropogenic impact and partially restored during reclamation. The data of remote sensing of the Earth (RS) allow to quickly evaluate the thickness of the fertile soil layer of disturbed areas. The purpose of the work is to study the possibility of using the vegetation index NDVI for remote assessment of the thickness of the fertile layer of technologically disturbed soils. The object of research is the soil cover of agricultural land represented on 26 land plots with a total area of 3 ha. According to satellite images, the initial state of the soil cover of the territory was uniform. The NDVI cartograms reflect the dynamics of projective cover by plants in space and time. According to NDVI, a significant change in the projective cover was established compared with the initial state of the territory. It was established that the thickness size of the applied fertile

---

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова», ул. Петропавловская, д. 23, 614990, Пермь, Россия; *e-mail*: [chascshin@mail.ru](mailto:chascshin@mail.ru)

<sup>2</sup> FSBEI HE “Perm State Agro-Technological University named after academician D.N. Pryanishnikov”, Petropavlovskaya str., 23, 614990, Perm, Russia; *e-mail*: [chascshin@mail.ru](mailto:chascshin@mail.ru)

layer affects the rate of development of biomass of herbaceous plants. The closest reliable relationship between NDVI and the fertile soil layer is observed after the appearance of the first seedlings in the reclaimed territory. The correlation coefficients of NDVI with the thickness of the fertile soil layer are 0.65 on average over the plots and 0.71 at specific points of measurement of the fertile layer.

**KEYWORDS:** Perm region, land reclamation, NDVI, Landsat data, Sentinel-2 data

## ВВЕДЕНИЕ

Мощность плодородного слоя почвы является важным показателем её плодородия, особенно в условиях рискованного земледелия Пермского края [Самофалова, 2015]. Изменение мощности плодородного слоя почвы на территориях, не подверженных водной и ветровой эрозии, часто происходит при строительстве новых дорог и реконструкции существующих. При этом временное занятие прилегающих территорий приводит к разрушению на них почвенного покрова с последующим восстановлением путём рекультивации. Данные работы регламентируются ГОСТ 17.5.3.06-85<sup>1</sup>. Однако после завершения работ возвращенный плодородный слой почвы часто распределён неравномерно.

Поэтому возможности данных дистанционного зондирования эффективны в оценке состояния техногенно-нарушенных почв. По литературным данным, она выполняется косвенно, через состояние растений по вегетационному индексу NDVI [Ничипорович, Радевич, 2012; Khalil, 2014; Bhardwaj et al., 2016]. Роль NDVI как индикационного показателя плодородия показана для различных типов почв России [Савин, Танов, 2014; Васильев и др., 2018; Гонн, Савенков, 2019], однако исследований по использованию вегетационного индекса в оценке мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных почв на территории Пермского края не проводилось. При этом опыт зарубежных исследований свидетельствует о значительной связи между пространственной картиной плодородия почвы и NDVI [Fabiyyi, 2013]. На нарушенных почвах Египта при помощи индекса NDVI выявлено увеличение площади растительности после проведения восстановительной мелиорации [Bakr, 2010]. Также на NDVI влияет влажность плодородного слоя почвы [Корниенко, 2017]. Таким образом, оперативно оценить пространственную неоднородность мощности плодородного слоя почвы нарушенных участков позволяют данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). Для этого необходимо установить взаимосвязь наземных измерений плодородного слоя нарушенной почвы и NDVI.

Цель работы — изучить возможность использования вегетационного индекса NDVI для дистанционной оценки мощности плодородного слоя техногенно-нарушенной почвы.

Задачи исследований:

- провести наземную оценку фактической мощности плодородного слоя почвы;
- установить периоды техногенной трансформации почвенного покрова;
- оценить взаимосвязь мощности плодородного слоя почвы и вегетационного индекса NDVI.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований выбраны почвы 26 учтенных земельных участков, на которых проведена рекультивация (по договору с организацией, осуществляющей рекультивацию земель). Участки расположены Пермском районе Пермского края (рис. 1). Категория земель — земли сельскохозяйственного назначения. Рельеф территории участков ровный. Общая площадь равна 3 га, а площадь каждого из участков примерно по 0,11 га.

<sup>1</sup> ГОСТ 17.5.3.06–85. Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. 4 с.

Изучены почвы: светло-серая лесная тяжелосуглинистая на эталонных участках (под №№ 1 и 24) и техногенные поверхностные образования среднесуглинистого и тяжёлосуглинистого гранулометрического состава на нарушенных участках. Территория участков в течение 7 лет использовалась для размещения строительной техники, задействованной на реконструкции трассы Р 242 Пермь – Екатеринбург. После завершения работ была проведена рекультивация, однако пространственное распределение плодородного слоя почвы стало неравномерным.

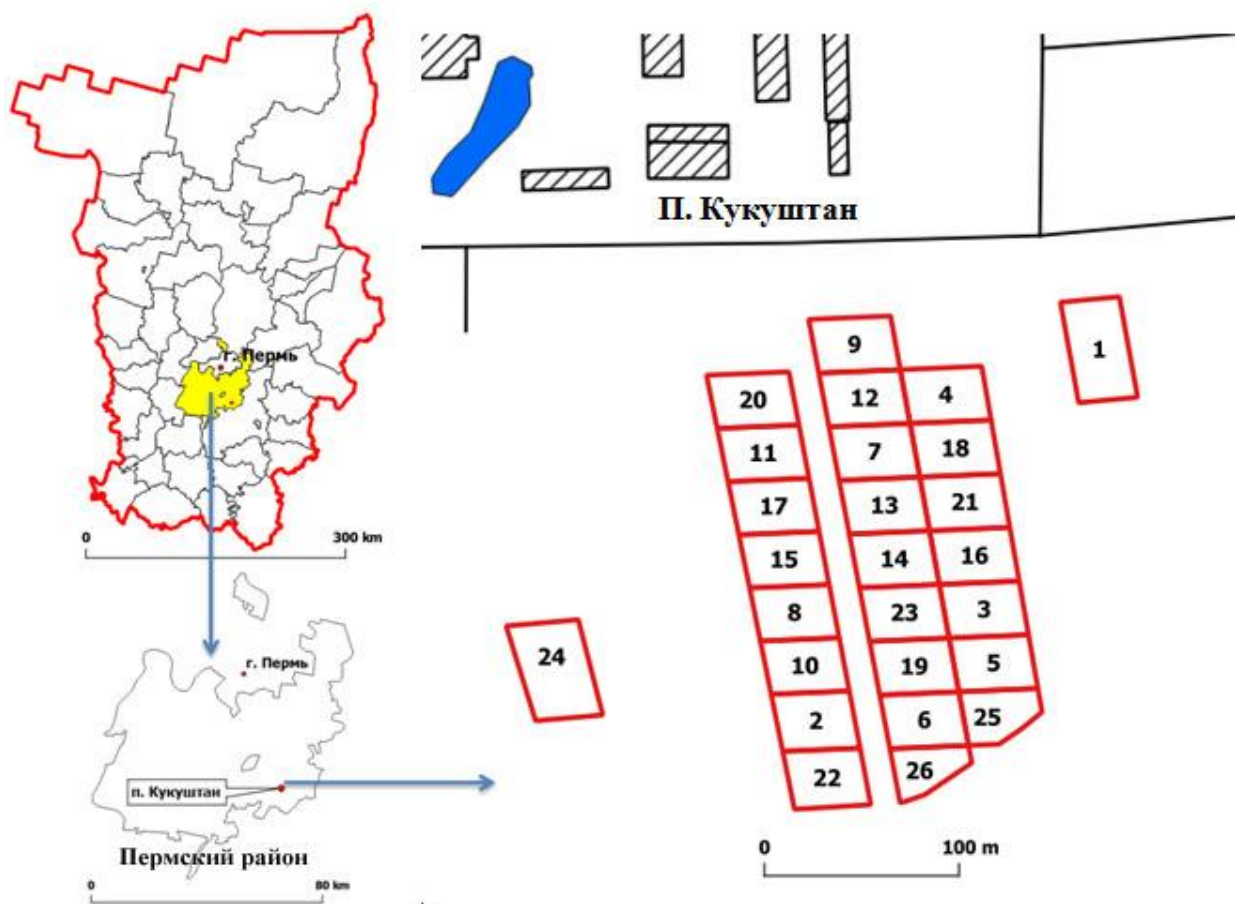


Рис. 1. Расположение земельных участков на территории Пермского края  
 Fig. 1. Location of lands in the Perm region

Полевые исследования проводились в октябре 2019 г. Они включали в себя:

- наземные измерения толщины плодородного слоя техногенно-нарушенных почв в прикопках, вскрывающих два верхних горизонта почвы;
- описание почвы в полнопрофильном разрезе на эталонном участке 24;
- отбор смешанных образцов почв по диагонали нарушенных участков;
- описание растительности на нарушенной и ненарушенной частях территории.

Обработка данных дистанционного зондирования и их сопоставление с наземными наблюдениями выполнено в QGIS. Перечень использованных ДДЗ представлен в табл. 1.

Табл. 1. Характеристика использованных спутниковых снимков  
 Table 1. Description of used satellite imagery

№ п/п	Сенсор	Дата съёмки	Решаемая задача	Источник
1	Landsat-5	Июль 2011	Оценка исходного состояния почв по NDVI	USGS
2	Landsat-5	Август 2011	Оценка исходного состояния почв по NDVI	USGS
3	Sentinel-2	Июль 2016	Оценка проективного покрытия растениями нарушенных участков. Расчёт NDVI	USGS, Sentinel HUB
4	Sentinel-2	Июнь 2018	Выявление периода рекультивации. Оценка самозарастания участков после рекультивации. Расчёт NDVI	USGS, Sentinel HUB
5	Sentinel-2	Июль 2018	Оценка динамики проективного покрытия растениями после рекультивации. Расчёт NDVI	USGS, Sentinel HUB
6	Sentinel-2	Июль 2019	Оценка современного проективного покрытия растениями. Расчёт NDVI	USGS

Вегетационный индекс NDVI вычислен по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

где NIR — отражение в ближнем инфракрасном канале снимка; RED — отражение в красном канале снимка [Черепанов, 2011].

В связи с различным пространственным разрешением снимков (Landsat-5 – 30 м, Sentinel-2 – 10 м) и малой площадью участков рассчитанные NDVI-изображения приведены к размеру ячейки в 1 м путём передискретизации по методу интерполяции B-spline. Результаты вычисления NDVI оценивались по шкале ГИС-центра ПГНИУ для сельскохозяйственных растений территории Пермского края [Льянков, 2009].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам наземных наблюдений и измерений установлена техногенная нарушенность почв, которая выражается в значительном уменьшении мощности плодородного слоя (почти в 2 раза) по сравнению с эталонной светло-серой лесной почвой. Лабораторный анализ отобранных образцов показал смещение реакции среды у нарушенных почв в щелочную сторону от 0,6 до 0,9 (рН<sub>KCl</sub>). Мощность плодородного слоя сильно варьирует 0 до 38 см, при этом у эталонной почвы она равна 28 см (табл. 2). Фотографии состояния плодородного слоя почвы каждого участка отмечены номерами на картограмме (рис. 2) и представлены на рис. 3.

Сопоставление наземных измерений со спутниковыми изображениями свидетельствует о том, что исходное состояние почвенного покрова территории было равномерным (рис. 4). Изменения в проективном покрытии произошли в августе 2011 г. — появилась ровная форма границ антропогенных объектов строительной базы. Этот контур соответствует ареалу нарушенных почв (рис. 4а, июль 2016 г.). По серии снимков Sentinel-2 за июнь 2018 г. установлен период проведённой рекультивации — с 15 по 24 июня (рис. 4б). С 23 июля 2018 г. наблюдается процесс естественного зарастания травянистыми растениями от периферии к центру территории (рис. 4в, 4г).

Табл. 2. Мощность плодородного слоя почв нарушенных и фоновых участков  
 Table 2. The thickness of the fertile soil layer on disturbed and background areas

Номер участка	Мощность, см	Номер участка	Мощность, см	Номер участка	Мощность, см
1**	30	10	18	19	23
2	20	11	19	20	20
3	7	12	29	21*	6
4	13	13*	8	21	30
5	7	14	17	22	18
6	20	15	23	23	30
7	20	16	13	25	12
8	25	17	38	26	20
9	0	18	23	24**	28

\* — нарушенная часть земельного участка; \*\* — эталонный земельный участок

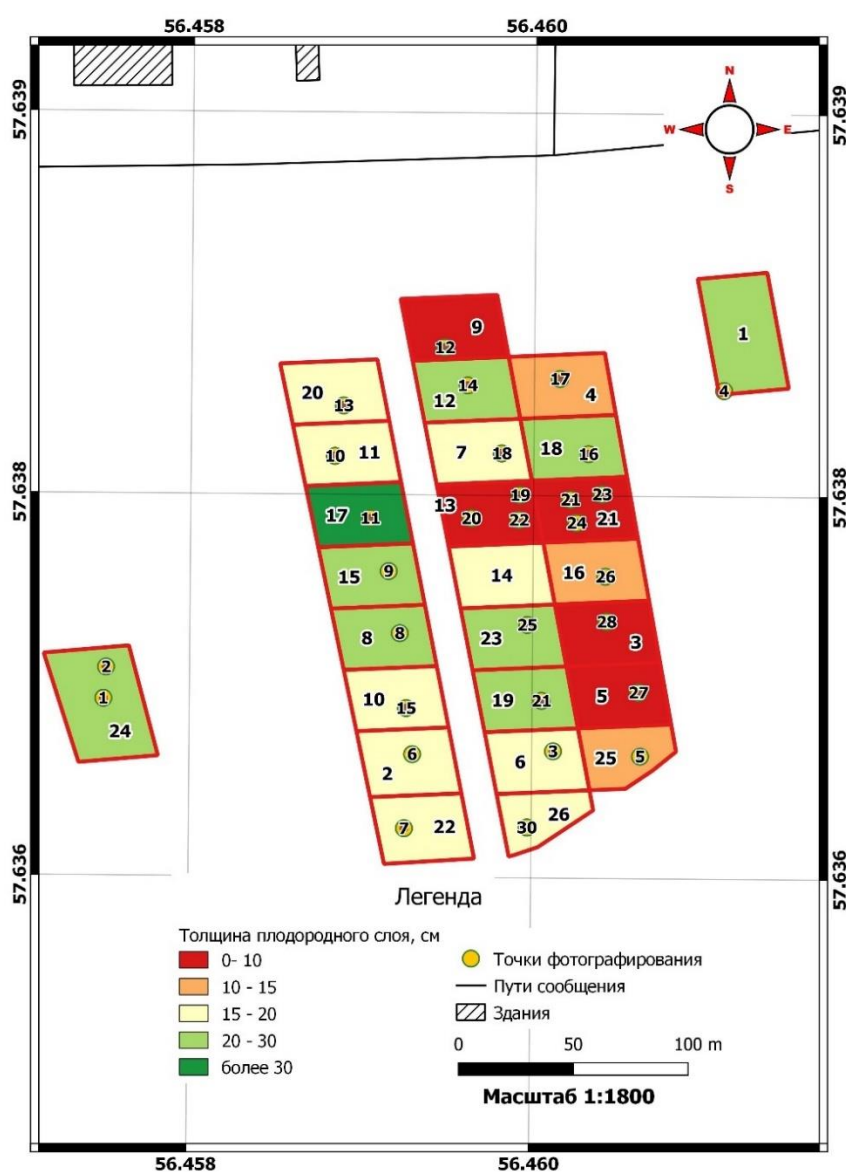


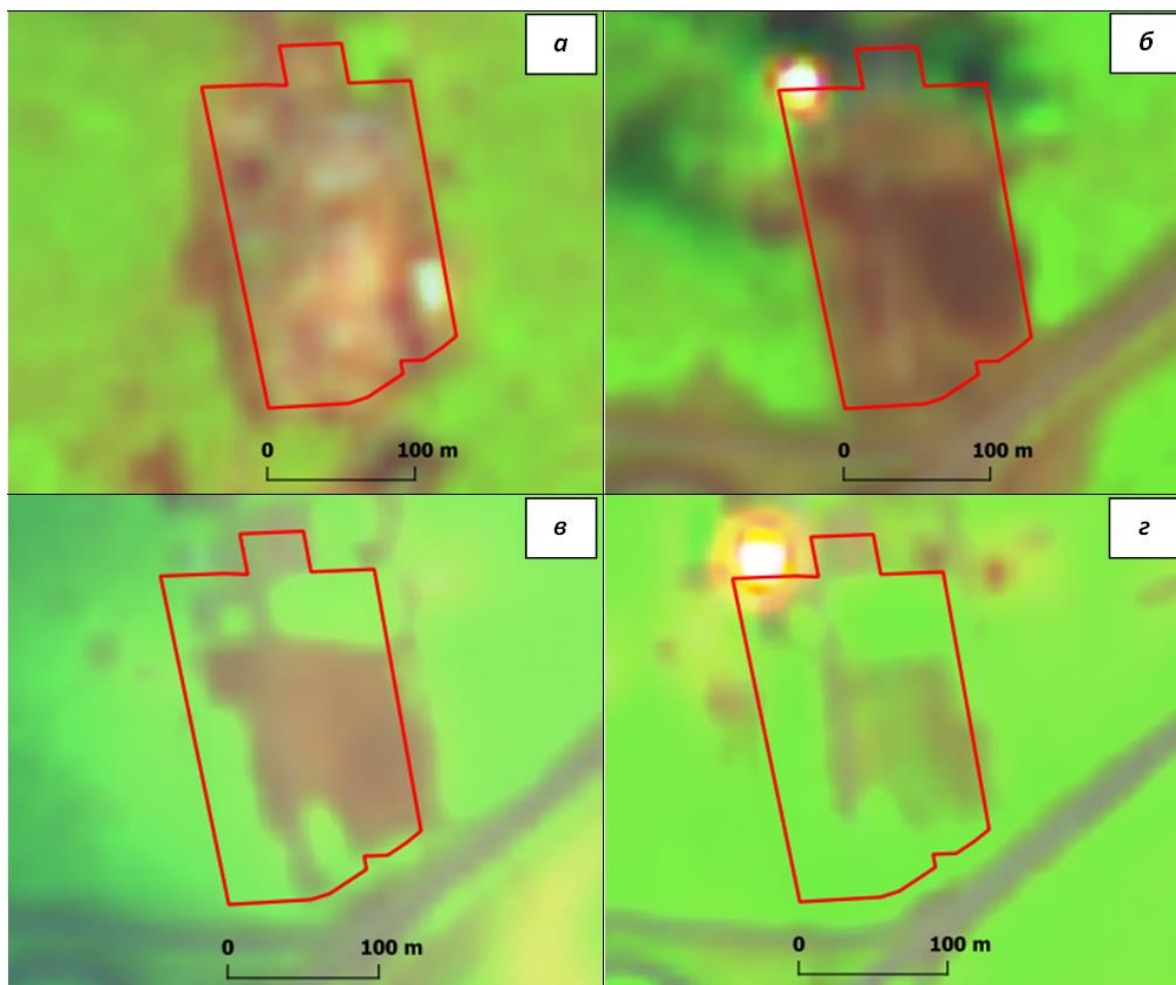
Рис. 2. Картограмма мощности плодородного слоя почвы  
 Fig. 2. Cartogram of fertile soil thickness





*Рис. 3. Состояние плодородного слоя почвы с различной мощностью (к картограмме мощности плодородного слоя почв)*

*Fig. 3. The state of the fertile soil layer with different thicknesses (to the map of the thickness of the fertile soil layer)*



*a (a), б (b), в (c), г (d)*

*Рис. 4. Процесс зарастания техногенно-нарушенных почв:  
 а — почвенный покров отсутствует (июль 2016 г.);  
 б — проведена техническая рекультивация (июнь 2018 г.);  
 в — начало появления растений (июль 2018 г.);  
 г — сформирован растительный покров (июль 2019 г.)*

*Fig. 4. The process of overgrowing man-made disturbed soils:  
 a — no soil cover (July 2016);  
 b — technical restoration was carried out (June 2018);  
 c — the beginning of the appearance of plants (July 2018);  
 d — vegetation cover formed (July 2019)*

Таким образом, начало восстановления травостоя произошло в июле. Поэтому по июльским датам съёмки выполнена оценка связи NDVI с мощностью плодородного слоя. На картограммах NDVI отражена динамика проективного покрытия растениями в пространстве и времени (рис. 5). По ним установлено значительное изменение в проективном покрытии по сравнению с первоначальным состоянием территории.

Средние значения NDVI сопоставлялись с мощностью плодородного слоя по 4 выделенным группам: фоновые участки, участки с мощностью до 10 см, участки с мощностью от 10 до 20 см, участки с мощностью более 20 см. В результате установлено, что размер толщины нанесенного плодородного слоя влияет на скорость развития биомассы травянистых растений (рис. 6).



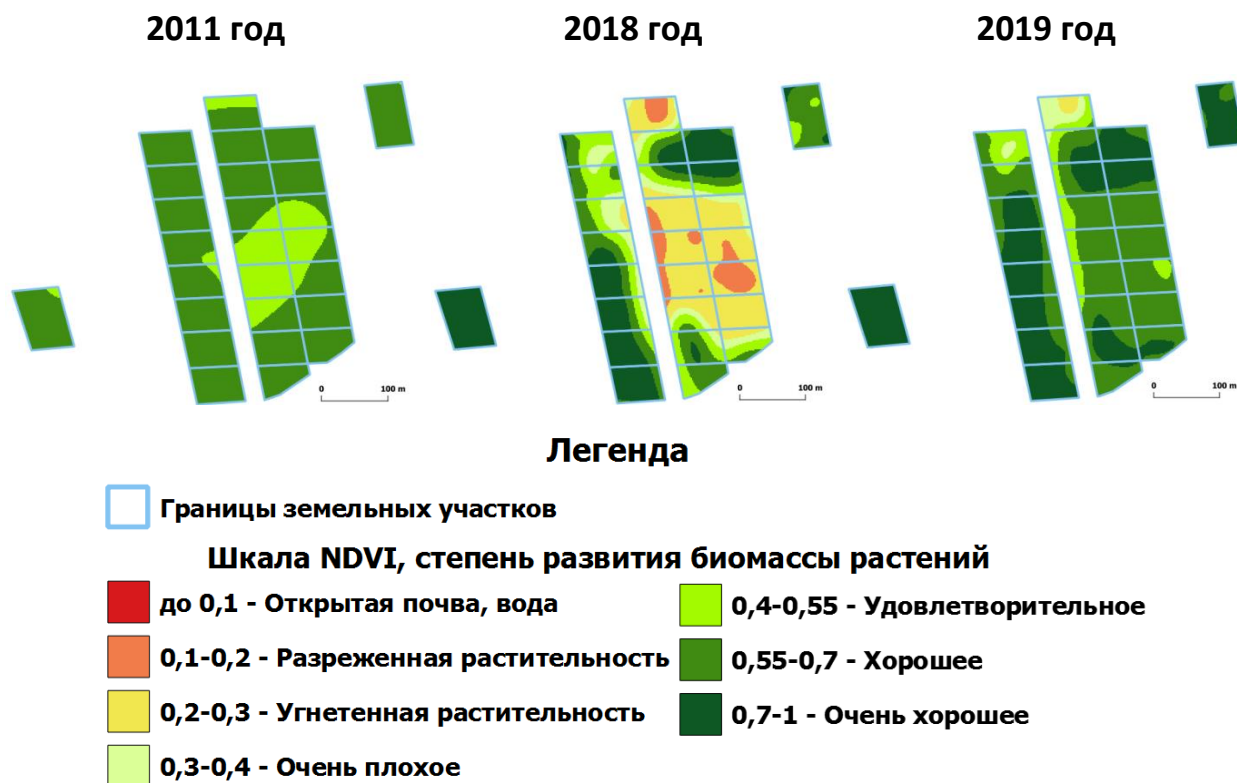


Рис. 5. Картограммы динамики индекса растительности NDVI в июле  
 Fig. 5. Cartograms of dynamics of the NDVI vegetation index in July

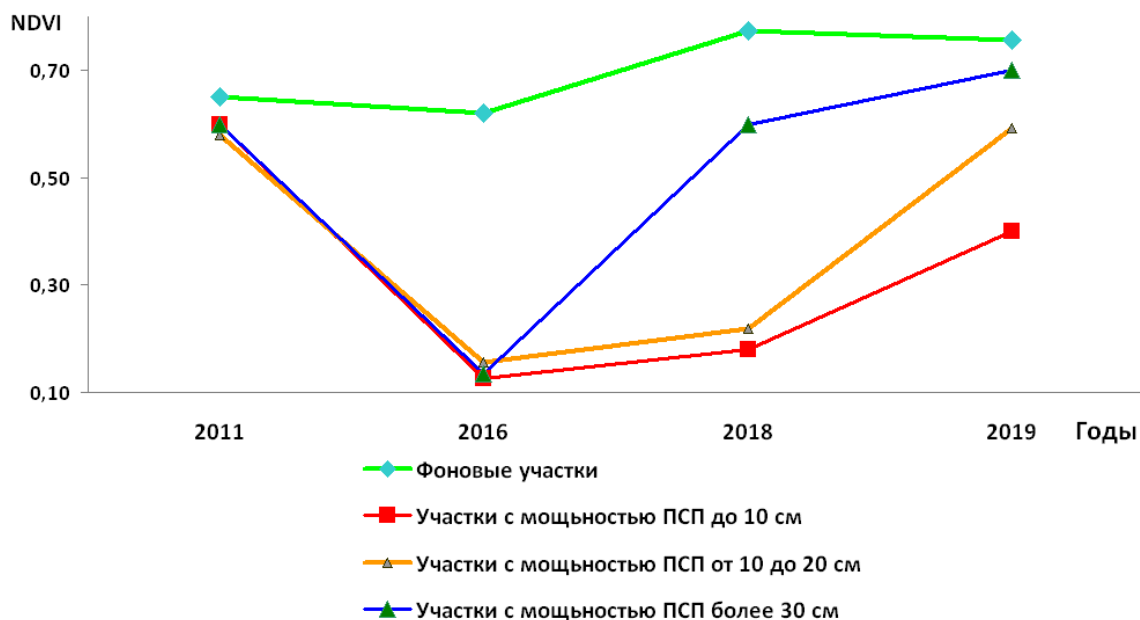


Рис. 6. Динамика средних NDVI в границах земельных участков  
 Fig. 6. Dynamics of average NDVI within the boundaries of land



Табл. 3. Коэффициенты корреляции мощности плодородного слоя и NDVI  
 Table 3. Correlation coefficients for fertile soil layer thickness and NDVI

Пространственный охват исходных значений	2011 г.	2016 г.	2018 г.	2019 г.
В среднем по участкам (n=26)	0,28	0,41*	0,65**	0,62*
В точках измерения плодородного слоя (n=28)	0,29	0,39	0,71**	0,68**

\* — достоверно при  $P = 0,95$ ; \*\* — достоверно при  $P = 0,99$

Изменение величины NDVI по периодам дистанционных наблюдений за участками отражает корреляционная зависимость от меняющейся мощности плодородного слоя почвы. Влияние мощности нанесенного плодородного слоя на величину биомассы травянистых растений отражают достоверные коэффициенты корреляции, представленные в табл. 3.

Наиболее тесная достоверная взаимосвязь NDVI и мощности плодородного слоя почвы наблюдается после появления первых всходов на рекультивированной территории. Поэтому создание модели, основанной на зависимости вегетационного индекса в период начала самозаращения от мощности нанесённого плодородного слоя, позволит выделить области, нуждающиеся в добавлении растительного грунта, и таким образом дать оценку проведённой рекультивации и чёткие рекомендации по её доработке.

## ВЫВОДЫ

По результатам проведённых исследований сделаны следующие выводы:

- основным проявлением техногенной нарушенности почв, которую можно оценить по ДДЗ, является уменьшение мощности плодородного слоя почти в 2 р. по сравнению с эталонной почвой;
- мощность плодородного слоя лимитирует самозаращение нарушенных земельных участков травянистой растительностью;
- наилучшим периодом оценки результатов рекультивации почв по вегетационному индексу является время спустя месяц после появления всходов первых растений, что подтверждается тесной корреляционной зависимостью в точках наземных измерений.

Результаты исследований могут быть использованы для выделения границ рекультивированных земельных участков, на которые нанесено недостаточное количество плодородного слоя или плодородный слой распределён неравномерно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев С.М., Митяева Л.А., Домашенко Ю.Е. Обоснование необходимости проведения мероприятий по восстановлению нарушенного почвенного покрова юга Ростовской области. Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2018. № 1. С. 59–66.
2. Гонн Н.В., Савенков О.А. Связь показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы со свойствами пахотного горизонта чернозёмов глинисто-иллювиальных элювирированных и тёмно-серых почв. Почвоведение, 2019. № 3. С. 377–386.
3. Корниенко С.Г. Вариации коэффициентов отражения в красной, ближней инфракрасной области спектра и индекса NDVI образцов тундровой растительности в зависимости от влажности субстратов. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017. Т. 14. № 3. С. 225–234.

4. *Ничипорович З.А., Радевич Е.А.* Опыт использования NDVI-индекса для мониторинга сельскохозяйственных земель по данным спектрально-космической съемки IKONOS. Журнал прикладной спектроскопии, 2012. № 4. С. 681–684.
5. Облачный API для просмотра спутниковых снимков «Sentinel Hub». Электронный ресурс: [www.sentinel-hub.com](http://www.sentinel-hub.com) (дата обращения 01.12.2019).
6. Портал геологической службы США. Электронный ресурс: [earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov) (дата обращения 06.12.2019).
7. *Пьянков С.В., Калинин Н.А., Связов Е.М., Смирнова А.А., Некрасов И.Б.* Мониторинг состояния сельскохозяйственных культур в Пермском крае по данным дистанционного зондирования земли. Вестник Пермского университета. Сер. Биология, 2009. Вып. 10 (36). С. 147–153.
8. *Савин И.Ю., Танов Э.Р.* О возможностях оценки качества пахотных угодий Баксанского района Кабардино-Балкарии на основе спутникового сервиса «ВЕГА». Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 3. С. 180–192.
9. *Самофалова И.А., Мудрых Н.М.* Агроэкологическая оценка органического вещества в дерново-подзолистых почвах Пермского края: Монография. Пермь: ИПЦ Прокрость, 2015. 154 с.
10. *Черепанов А.С.* Вегетационные индексы. Геоматика, 2011. № 2. С. 98–102.
11. *Bakr N., Weindorf D.C., Bahnassy M.H., Marei S.M., El-Badawi M.M.* Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi-temporal Landsat data. Applied Geography, 2010. No 30. P. 592–605.
12. *Bhardwaj D.R., Bandy M., Pala N.A., Rajput B.S.* Variation of biomass and carbon pool with NDVI and altitude in sub-tropical forests of northwestern Himalaya. Environ Monit Assess, 2016. No 188 (11). P. 635–644.
13. *Fabiyi O.O., Ige-Olumide O., Fabiyi A.O.* Spatial analysis of soil fertility estimates and NDVI in south-western Nigeria: A new paradigm for routine soil fertility mapping. Research Journal of Agriculture and Environmental Management, 2013. V. 2 (12). P. 403–411.
14. *Khalil A.A., Essa Y.H., Hassanein M.K.* Monitoring Agricultural Land Degradation in Egypt Using MODIS NDVI Satellite Images. Nature and Science, 2014. № 12(8). P. 15–21.

#### REFERENCES

1. *Bakr N., Weindorf D.C., Bahnassy M.H., Marei S.M., El-Badawi M.M.* Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi-temporal Landsat data. Applied Geography, 2010. No 30. P. 592–605.
2. *Bhardwaj D.R., Bandy M., Pala N.A., Rajput B.S.* Variation of biomass and carbon pool with NDVI and altitude in sub-tropical forests of northwestern Himalaya. Environ Monit Assess, 2016. No 188 (11). P. 635–644.
3. *Cherepanov A.S.* Vegetation Indices. Geomatics, 2011. No 2. P. 98–102 (in Russian).
4. Cloud API for satellite imagery «Sentinel Hub». Web resource: [www.sentinel-hub.com](http://www.sentinel-hub.com) (accessed 01.11.2019).
5. *Gopp N.V., Savenkov O.A.* The Relationship between NDVI and spring wheat yield and the properties of arable horizon of eluviated clay-illuvial chernozems and dark gray soils. Soil science, 2019. No 3. P. 377–386 (in Russian).
6. *Fabiyi O.O., Ige-Olumide O., Fabiyi A.O.* Spatial analysis of soil fertility estimates and NDVI in south-western Nigeria: A new paradigm for routine soil fertility mapping. Research Journal of Agriculture and Environmental Management, 2013. V. 2 (12). P. 403–411.
7. *Khalil A.A., Essa Y.H., Hassanein M.K.* Monitoring Agricultural Land Degradation in Egypt Using MODIS NDVI Satellite Images. Nature and Science, 2014. № 12(8). P. 15–21.
8. *Kornienko S.G.* Variations of the reflection coefficients in the red, near infrared region of the spectrum and the NDVI index of tundra vegetation samples depending on the moisture content of

the substrates. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, 2017. V. 14. No 3. P. 225–234 (in Russian).

9. *Nichiporovich Z.A., Radevich E.A.* The experience of using the NDVI-index for monitoring agricultural lands of woodland according to IKONOS spectrozonal satellite imagery. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2012. No 4. P. 681–684 (in Russian).

10. *Pyankov S.V., Kalinin N.A., Sviyazov E.M., Smirnova A.A., Nekrasov I.B.* Monitoring the state of crops in the Perm region according to remote sensing data. *Bulletin of the Perm University. Ser. Biology*, 2009. V. 10 (36). P. 147–153 (in Russian).

11. *Samofalova I.A., Mudrykh N.M.* Agroecological assessment of organic matter in sod-podzolic soils of the Perm Territory: Monograph. Perm: Prokrost, 2015. 154 p. (in Russian).

12. *Savin I.Yu., Tanov E.R.* On possibilities of arable lands quality evaluation in Baksan District of Kabardino-Balkaria based on satellite service VEGA. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, 2014. V. 11. No 3. P. 180–192 (in Russian).

13. USGS Earth Explorer. Web resource: [earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov) (accessed 06.12.2019).

14. *Vasilyev S.M., Mityaeva L.A., Domashenko Yu.Ye.* Substantiation of the required measures to restore the disturbed soil cover of the south of the Rostov region. *Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2018. No 1. P. 59–66 (in Russian).

---