DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-3-290-305

А.Н. Чашин, В.Ю. Гилёв

Пермский государственный аграрно-технологический университет
имени академика Д.Н. Прянишникова,
614990 г. Пермь, Российская Федерация

Оценка мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных почв с применением вегетационного индекса NDVI

В работе освещены возможности использования вегетационного индекса NDVI для оценки пространственной неоднородности мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных земель. Известна роль дистанционно определяемого показателя NDV как индикатора почвенного плодородия, однако на территории Пермского края на рекультивированных землях подобных исследований не проводилось. Целью работы являлось оценка мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных почв Пермского края с использованием спектрального индекса NDVI. Объект исследований – техногенно-нарушенные почвы земельных участков в поселке Кукуштан Пермского района Пермского края. Изначально почвенный покров земельных участков был представлен светло-серой лесной почвой. Затем с 2011 по 2018 г. на участках располагалась строительная площадка, обеспечивающая реконструкцию автодороги Р242 Пермь–Екатеринбург. Период промышленного изъятия почв установлен по данным дистанционного зондирования – Landsat 5 и Sentinel 2. Измерения мощности плодородного слоя выполнялись в прикопках на каждом участке. Сопоставление наземных наблюдений с данными дистанционного зондирования свидетельствуют о тесной взаимосвязи размера плодородного слоя почвы с вегетационным индексом NDVI. Достоверная корреляция этих показателей наиболее сильна на начальных стадиях формирования растительного покрова техногенно-нарушенных участков. Мощность плодородного слоя почвы положительно влияет на величину и динамику NDVI. На основе установленной

взаимосвязи наземных измерений и NDVI выделен контур почвенного покрова, нуждающийся в добавлении растительного грунта.

Ключевые слова: плодородный слой почвы, NDVI, данные дистанционного зондирования, рекультивация, Пермский край

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Чашин А.Н., Гилёв В.Ю. Оценка мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных почв с применением вегетационного индекса NDVI // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 3. С. 290–305. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-3-290-305

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-3-290-305

A.N. Chashchin, V.Yu. Gilev

Perm State Agro-Technological University
named after Academician D.N. Pryanishnikov,
Perm, 614990, Russian Federation

Estimation of the thickness of the fertile layer of technologically disturbed soils using the NDVI vegetation index

The article highlights the possibilities of using the vegetation index NDVI to assess the spatial heterogeneity of the thickness of the fertile layer of technologically disturbed soils. The role of the remotely determined NDVI indicator is known as an indicator of soil fertility, however, no similar studies have been conducted on the territory of Perm region on technologically disturbed soils. The aim of the study was to assess the spatial heterogeneity of the thickness of technologically disturbed soils of Perm region using the NDVI spectral index. The object of research is the soil cover of technologically disturbed land plots in the village of Kukushtan, Perm region. Initially, the soil cover of the land was represented by light gray forest soil. Then, from 2011 to 2018, a construction site was located on the plots for the reconstruction of E-242 Perm–Yekaterinburg highway. The period of industrial soil removal was established according to remote sensing data – Landsat 5 and Sentinel 2. Measurements of the thickness of the fertile

layer were carried out in digging at each site. A comparison of ground based measurements with remote sensing data indicates a close relationship between the fertile soil layer and the NDVI vegetation index. A reliable correlation of these indicators is the strongest at the initial stages of the formation of the vegetation cover of technologically disturbed soils. The thickness of the fertile soil layer positively affects the magnitude and dynamics of NDVI. Based on the established relationship between ground-based measurements and NDVI, a soil contour is identified that needs to be added to fertile soil.

Key words: fertile soil horizon, NDVI, remote sensing data, land reclamation, Perm region

CITATION: Chashchin A.N., Gilev V.Yu. Estimation of the thickness of the fertile layer of technologically disturbed soils using the NDVI vegetation index. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. No. 3. Pp. 290–305. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-3-290-305

Введение

Строительство новых линейных объектов, обслуживание и ремонт существующих приводит к значительному нарушению почвенного покрова прилегающих территорий. Техногенному воздействию подвергаются участки, на которых происходит складирование инертных материалов и создание временных строительных площадок. Согласно ГОСТ 17.5.3.06–85 (Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ), на таких площадках почвенный плодородный слой снимается на мощность от 20 до 120 см (в зависимости от типа почв) и после завершения строительных работ складированный слой полностью возвращается на место. Однако очень часто восстановление первоначального состояния почвы не происходит. После рекультивации в подповерхностных горизонтах почвы остаются следы строительных материалов, плодородный слой почвы (ПСП) неравномерно распределяется по поверхности и, как правило, для нарушенных почв не превышает 15 см, что может быть в несколько раз меньше, чем норма снятия (20–30 см для Пермского района) по тому же ГОСТу 17.5.3.06–85. Это происходит по причине выполнения работ большинством строительных компаний по своду правил 82.13330.2016 (СП 82.13330.2016 Благоустройство территорий), в соответствии с п. 46 которых толщина ПСП должна быть не менее 15 см. В результате исходное состояние почвенного покрова на строительных площадках оценить затруднительно из-за полной или частичной утраты плодородного слоя.

В связи с этим перспективна оценка состояния техногенно-нарушенных почв по данным дистанционного зондирования, которая выполняется косвенно, через состояние растений и отражает почвенный покров не только в текущее время, но и до нарушения. Роль вегетационного индекса NDVI как индикатора почвенного плодородия показана для различных типов почв России [Савин, 2014; Васильев, 2018; Гопп, 2019], но при этом исследований по использованию показателя NDVI в оценке мощности плодородного слоя техногенно-нарушенных почв на территории Пермского края не проводилось.

Цель работы – оценить пространственную неоднородность мощности техногенно-нарушенных почв Пермского края с использованием спектрального индекса NDVI.

Объектом исследований является почвенный покров техногенно-нарушенных земельных участков на территории поселка Кукуштан Кукуштанского сельского поселения Пермского района Пермского края (рис. 1). Территория исследований разделена на 26 учтенных земельных участков равной площадью по 0,11 га. Из них 2 участка являются фоновыми (5224, 5163). Границы участков нанесены с публичной кадастровой карты. Общая площадь составляет 3 га.

Рис. 1. Расположение земельных участков на территории Пермского края

Fig. 1. Location of lands in Perm region

В период с 2011 по 2018 г. на территории располагалась строительная площадка, обеспечивающая реконструкцию участка автодороги Р 242 Пермь–Екатеринбург. После завершения работ почвенный покров объекта исследований значительно изменился.

По геоботаническому районированию территория относится к Тулва-Иреньско-Краснокамскому округу полосы подтаежных лесов Камско-Печорско-Западноуральской провинции Урало-Западносибирской таежной провинции [Геоботаническое районирование..., 1989]. По физико-географическому районированию территория находится на Русской равнине, Тулвенско-Прикамской возвышенности [Максимович, 1979]. Мезорельеф участков – плоско-волнистая равнина.

Естественный почвенный покров в пределах области исследований, по данным крупномасштабного почвенного обследования совхоза «Курашимский» [Почвы совхоза..., 1989], выполненного Пермским филиалом Уральского государственного проектного института по землеустройству в 1989 г., представлен светло-серыми лесными тяжелосуглинистыми почвами на лессовидных отложениях (рис. 2).

Рис. 2. Расположение земельных участков на крупномасштабной почвенной карте

Участки расположены на светло-серой лесной тяжелосуглинистой почве на лессовидных отложениях

Fig. 2. The location of land on the substrate of a large-scale soil map
The sites are located on light gray forest heavy loamy soil on loess-like sediments

Материалы и методы

Мощность плодородного слоя почвы измерялась в прикопках, которые закладывались на каждом земельном участке: в центре участка и контурах с низким проективным покрытием растениями и наличием поверхностного переувлажнения почвы. Масштаб съемки детальный – 1 : 2000. Места закладки прикопок совпадают с отмеченными на картограмме мощности плодородного слоя почвы точками фотографирования (рис. 3).

Создание картографических материалов и обработка спутниковых снимков выполнялось в QGIS. В качестве данных дистанционного зондирования использованы мультиспектральные снимки серии Landsat 5 (июль, август 2011 г.) и Sentinel 2 (июль 2016 г., июнь, июль 2018 г. и июль 2019 г.). Выявление изменений в состоянии нарушенных почв с 2016 по 2019 г. проведено по снимкам Sentinel 2 в синтезе каналов «Agriculture» при помощи службы Sentinel Hub на базе QGIS.

Спектральный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который используется для оценки состояния растительности, 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].

Рассчитанные в работе значения NDVI интерпретировались в соответствии со шкалой, разработанной учеными Пермского ГИС-центра для сельскохозяйственных культур Пермского края [Пьянков, 2009]. Градации составляют легенду карт индекса NDVI. Отобранный для вычисления NDVI временной ряд данных имеет различное пространственное разрешение – от 30 м (Landsat 5) до 10 м (Sentinel 2), недостаточное для создания качественного покрытия на участки общей площадью в 3 гектара. Поэтому выполнено повышение разрешения вычисленных NDVI-растров до 1 м методом Resampling.

Почва эталонных участков названа в соответствии с классификацией 1977 г. [Классификация..., 1977], а нарушенных – по классификации почв России 2004 г. [Классификация..., 2004].

Результаты и обсуждение

Мощность гумусового горизонта фоновой светло-серой лесной почвы (участок 5224) по результатам изучения морфологических признаков составила 28 см. На техногенных поверхностных образованиях

нарушенных участков плодородный слой сильно варьирует от 0 до 38 см. Пространственная неоднородность этого показателя в среднем по земельным участкам представлена в виде картограммы (см. рис. 3). На картограмме отмечены и пронумерованы точки измерения ПСП, а примеры состояния почвенного покрова с различной мощностью показаны на рис. 4. На участках под номерами 5195, 5192, 5190, 5182, 5169, 5186, 5181, 5199, 5194, 5175, 5712, 5193 мощность плодородного слоя почвы соответствует фону. Мощность от 15 до 20 см имеют участки под номерами 5185, 5184, 5198, 5188. На восьми участках (5171, 5191, 5706, 5183, 5187, 5197, 5170, 5174) плодородный слой менее 15 см, что не соответствует нормам. При этом мощность ПСП на участках 5187, 5197, 5170, 5174 является минимальной и не превышает 10 см. Поверхность участка 5183 полностью перекрыта инородным материалом, плодородный слой отсутствует. Такая же ситуация наблюдается на половине участка 5195.

Для понимания причин и динамики пространственной неоднородности мощности ПСП в границах массива земельных участков изучены разновременные данные дистанционного зондирования. По ним установлен период действия строительной площадки – с августа 2011 г. по июнь 2018 г. На рис. 5, *a* (июль 2016 г.) область нарушенных участков занимает строительная площадка. По снимку видно, что она включает ровные формы границ различных антропогенных объектов. Признаки открытой поверхности почвы впервые с 2011 г. проявляются в июне 2018 г. (рис. 5, *b*) и свидетельствуют о проведенной в период с 15 по 24 июня рекультивации.

Самозарастание травянистыми растениями земельных участков началось в середине июля 2018 г. (рис. 5, *c*). Ровно через год вся территория покрыта растительностью (рис. 5, *d*), но внутри выделяется ареал с низким проективным покрытием.

Поскольку с июля 2018 г. почва участков уже имела современное состояние плодородного слоя, а состояние растительности ровно через год значительно отличается, для вычисления NDVI выбраны июльские даты снимков: Landsat 5 2011 г., характеризующий исходное состояние растительного покрова, и Sentinel 2 за 2016, 2018 и 2019 гг., которые отражают происходившие изменения. Представленные на рис. 6 картограммы индекса NDVI с разрешением 1 м ясно отражают границы степени развития растений, а также общее направление восстановления растительного покрова во времени.

Толщина плодородного слоя до 10 см [Thickness of the fertile layer up to 10 cm]

Толщина плодородного слоя от 10 до 15 см [Thickness of the fertile layer from 10 cm up to 15 cm]

Толщина плодородного слоя от 15 до 20 см [Thickness of the fertile layer from 15 cm up to 20 cm]

Толщина плодородного слоя более 30 см [Thickness of the fertile layer than 30 cm]

1 Номер точки фотографирования [Photo point number]

Рис. 4. Состояние плодородного слоя почв с различной мощностью (к картограмме мощности плодородного слоя почв)

Fig. 4. The state of the fertile soil layer with different thicknesses (to the map of the thickness of the fertile soil layer)

По созданным изображениям были вычислены средние значения NDVI-пикселей в границах каждого участка. Результаты свидетельствуют об изменениях проективного покрытия за 8 лет. На временной ход NDVI влияет история использования почв и мощность нанесенного

плодородного слоя. Фоновые участки имеют почти прямой график NDVI на уровне самых высоких значений с небольшими колебаниями, вероятно, обусловленными климатическими факторами (рис. 7). Динамика изменения показателя NDVI на техногенно-нарушенных почвах после проведенной рекультивации значительна и отражает зависимость скорости развития и распространения зеленой биомассы от мощности нанесенного плодородного слоя. Так, на участках, имеющих мощность более 30 см, состояние растений в 2019 г. почти соответствует фоновым. Наименьший тренд зарастания наблюдается у почв с мощностью ПСПП менее 10 см.

Рис. 5. Процесс зарастания техногенно-нарушенных почв:

a – почвенный покров отсутствует (июль 2016 г.); *b* – проведена техническая рекультивация (июнь 2018 г.); *c* – начало появления растений (июль 2018 г.); *d* – сформирован растительный покров (июль 2019 г.)

Fig. 5. The process of overgrowing man-made disturbed soils:

a – no soil cover (July 2016); *b* – technical reclamation was carried out (June 2018); *c* – the beginning of the appearance of plants (July 2018); *d* – vegetation cover formed (July 2019)

Шкала NDVI, степень развития биомассы растений
[NDVI scale, degree of plant biomass development]:

Рис. 6. Картограммы динамики вегетационного индекса в июле

Fig. 6. Cartograms of dynamics of the vegetation index in July

Рис. 7. Динамика средних NDVI в границах земельных участков

Fig. 7. Dynamics of average NDVI within the boundaries of land

Влияние мощности плодородного слоя почвы на вегетационный индекс может быть использовано при выделении контуров техногенно-нарушенных почв, а также почв, для которых технический этап рекультивации выполнен недостаточно. Поскольку определение

толщины верхнего слоя почвы проводилось на наиболее типичных частях участков, коэффициенты корреляции были рассчитаны по средним значениям пикселей земельных участков и данным из точек измерения мощности ПСП (табл. 1).

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции мощности
плодородного слоя почвы и NDVI
[Fertility layer correlation coefficients and NDVI]**

Пространственный охват исходных значений [Spatial coverage of baseline values]	Год [Year]			
	2011	2016	2018	2019
В среднем по участкам ($n = 26$) [Average for the sites ($n = 26$)]	0,28	0,41*	0,65**	0,62*
По точкам измерений мощности плодородного слоя почвы ($n = 28$) [By points of measurement of the thickness of the fertile soil layer ($n = 28$)]	0,29	0,39	0,71**	0,68**

* – достоверно при $P = 0,95$; ** – достоверно при $P = 0,99$.

[* – reliable at $P = 0.95$; ** – reliable at $P = 0.99$.]

При ненарушенном состоянии почвенного покрова (2011 г.) корреляционная связь не наблюдается, что подтверждает исходную однородность плодородного слоя почв и соответствие эталонным участкам. В 2016 г., когда значения NDVI нарушенных участков минимальны, а фоновых – максимальны, проявилась средняя связь. Достоверная сильная связь мощности плодородного слоя почвы и NDVI установлена в 2018 г. после появления первых всходов на рекультивированной территории. Небольшое уменьшение связи к 2019 г., вероятно, связано с развитием разнотравных ассоциаций на всей территории, имеющих неодинаковую биомассу. Следовательно, наиболее информативным периодом в оценке плодородного слоя по NDVI является время появления первых растений. Поэтому на основе спутниковых данных 2018 г. выявлены ареалы нуждаемости почв в рекультивации и агротехнических мероприятиях, а также рассчитаны их площади (рис. 8).

Таким образом, по вегетационному индексу NDVI установлены границы почвенного покрова, нуждающегося в дополнительном нанесении плодородного слоя на площади в 1 га.

Рис. 8. Картограмма мероприятий по восстановлению почв:

1 – почвенный покров участков не нуждается в проведении технического и биологического этапов рекультивации (площадь 1,0 га, или 37%);
 2 – проведение агротехнических мероприятий: подпахотное рыхление для снижения переуплотнения и увеличения водопроницаемости, планировка поверхности для ликвидации микропонижений (площадь 0,7 га или 26%);
 3 – участки с малой мощностью плодородного слоя почвы, требуется дополнительное нанесение плодородного грунта (площадь 1,0 га, или 37%)

Fig. 8. Cartogram of soil remediation activities:

1 – the soil cover of the sites does not need technical and biological stages of reclamation (area 1.0 hectares, or 37%); 2 – carrying out agrotechnical measures: subsurface loosening to reduce overconsolidation and increase water permeability, surface leveling to eliminate microlows (area 0.7 hectares or 26%); 3 – areas with low thickness of the fertile soil layer, additional application of fertile soil is required (area 1.0 hectares, or 37%)

Выводы

Спутниковые снимки отражают изменения, происходящие с мощностью плодородного слоя почвы, на нарушенных земельных участках. По ним установлены даты выполненной рекультивации и дана оценка динамики распространения растительного покрова в пространстве и времени. Мощность плодородного слоя почвы положительно влияет на величину и динамику NDVI. Для оценки плодородного слоя почвы по NDVI наиболее подходящим временем вегетационного периода является месячный срок после проведения технического этапа рекультивации. Выделение ареалов почв, требующих дополнительного проведения технической рекультивации, и расчет площадей нанесения недостающего растительного грунта основаны на тесной взаимосвязи вегетационного индекса и наземных измерений плодородного слоя почвы.

Библиографический список / References

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. [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. Pp. 59–66. (In Russ.)]

Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР / Отв. ред. В.Д. Александрова, Т.К. Юрковская. Л., 1989. [Geobotanicheskoye rayonirovaniye Nechernozemya evropeyskoy chasti RSFSR [Geobotanical zoning of the non-chernozem region of the European part of the RSFSR]. V.D. Aleksandrova, T.K. Yurkovskaya (eds.). Leningrad, 1989.]

Гопп Н.В., Савенков О.А. Связь показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы со свойствами пахотного горизонта черноземов глинисто-иллювиальных элювирированных и темно-серых почв // Почвоведение. 2019. № 3. С. 377–386. [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. Pp. 377–386. (In Russ.)]

Классификация и диагностика почв России / Шишов Л.Л., Тонконогова В.Д., Лебедева И.И. и др. Смоленск, 2004. [Shishov L.L., Tonkonogova V.D., Lebedeva I.I. et al. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Russian soil classification system]. Smolensk, 2004.]

Классификация и диагностика почв СССР. М, 1977. [Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR [Classification and soil diagnostics of the USSR]. Moscow, 1977.]

Максимович Г.А. Геоморфологическая карта Пермской области. Пермь, 1979. [Maksimovich G.A. Geomorfologicheskaya karta Permskoy oblasti [Geomorphological map of Perm Region]. Perm, 1979.]

Почвы совхоза «Курашимский» Пермского района Пермской области и рекомендации по их использованию. Пермь, 1989. [Pochvy sovkhosa «Kurashimskiy» Permskogo rayona Permskoy oblasti i rekomendatsii po ikh ispolzovaniyu [Soils of the “Kurasimsky” state farm of Perm region and recommendations for their use]. Perm, 1989.]

Мониторинг состояния сельскохозяйственных культур в Пермском крае по данным дистанционного зондирования земли / Пьянков С.В., Калинин Н.А., Свиязов Е.М. и др. // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2009. Вып. 10 (36). С. 147–153. [Pyankov S.V., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. et al. Monitoring the state of crops in the Perm region according to remote sensing data. *Bulletin of the Perm University. Biology Series*. 2009. Vol. 10 (36). Pp. 147–153. (In Russ.)]

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. [Savin I.Yu, Tanov E.R. On possibilities of arable lands quality evaluation in Baksan District of Kabardino-Balkaria based on satellite service VEGA. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. Vol. 11. No. 3. Pp. 180–192. (In Russ.)]

Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102. [Cherepanov A.S. Vegetation Indices. *Geomatics*. 2011. No. 2. Pp. 98–102. (In Russ.)]

Статья поступила в редакцию 20.12.2019, принята к публикации 24.03.2020

The article was received on 20.12.2019, accepted for publication 24.03.2020

Сведения об авторах / About the authors

Чашин Алексей Николаевич – кандидат биологических наук; доцент кафедры почвоведения, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, г. Пермь

Aleksey N. Chashchin – PhD in Biology; Associate Professor at the Department of Soil Science, Perm State Agro-Technological University, Perm

E-mail: chascshin@mail.ru

Гилёв Виталий Юрьевич – кандидат сельскохозяйственных наук; доцент кафедры почвоведения, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, г. Пермь

Vitaliy Yu. Gilev – PhD in Agriculture; Associate Professor at the Department of Soil Science, Perm State Agro-Technological University, Perm

E-mail: pochva2005@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

А.Н. Чашин – общее руководство направлением исследования, выполнение картографических материалов, анализ взаимосвязи мощности плодородного слоя почвы и вегетационного индекса NDVI, подготовка текста статьи

В. Ю. Гилёв – планирование исследования, выполнение натурных обследований мощности плодородного слоя почв, получение данных дистанционного зондирования, оценка потребности почв в восстановлении

Contribution of the authors

A.N. Chashchin – general direction of the research, execution of cartographic materials, analysis of the relationship between the fertile soil layer and the vegetation index NDVI, preparation of the text of the article

V.Yu. Gilev – planning of the research, performing field surveys of the thickness of the fertile soil layer, obtaining remote sensing data, assessment of soil restoration needs

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

All authors have read and approved the final manuscript