

УДК: 528.7

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-583-596

А.О. Полетаев¹

ВОЗМОЖНОСТИ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ АРЕАЛОВ РАЗГРУЗКИ ТВЕРДОГО СТОКА В ГРАНИЦАХ ВОДООХРАННЫХ ЗОН

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены современные возможности ГИС-технологий для мониторинга состояния почвенного покрова и процессов водной эрозии. Показаны возможности использования нормализованного разностного индекса растительности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) для оценки различных типов растительного покрова. Представлено обоснование выбора ключевого участка, включающего в себя как водоохранные зоны, так и ландшафтные позиции, сопряженные с ними по вещественно-энергетическим потокам. Представлен способ получения векторного слоя значений NDVI, рассчитанных по 9-ти спутниковым снимкам Sentinel-2 за период с марта по ноябрь 2021 г. Проведена классификация значений NDVI и объединение ячеек векторного слоя в классы. Представлены способы получения растров (с приведением формул) топографического индекса влажности (Topographical Wetness Index, TWI) и индекса мощности потока (Stream Power Index, SPI) на территорию ключевого участка. Проведено сопоставление векторного слоя значений NDVI с растрами TWI и SPI, а также со среднесуточными значениями температуры воздуха. Показана динамика значений NDVI за март–ноябрь 2021 г. на ключевом участке, приведена карта-схема векторного слоя значений NDVI, ранжированного по классам. Проведен расчет соотношения площадей различных классов на ключевом участке. Показаны растры топографического индекса влажности (TWI) и индекса мощности потока (SPI). Приведены примеры запросов к базам данных слоев, полученных в результате пересечения векторных слоев: TWI и NDVI, SPI и NDVI. Получены карты-схемы, основанные на комбинации значений NDVI, TWI, SPI, показывающие потенциально эрозионно-опасные участки. При сопоставлении усредненных среднесуточных значений температуры воздуха со средними значениями NDVI было выяснено, что корреляция между ними составляет 0.89. Предложены возможные меры, направленные на снижение экологической нагрузки на водоохранную зону.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: NDVI, TWI, SPI, водоохранные зоны, оценка эрозионной опасности

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, ул. Победы, д. 85, 308015, Белгород, Россия; *e-mail*: poletaev@bsu.edu.ru

Arseniy O. Poletaev¹

POSSIBILITIES OF GIS TECHNOLOGIES FOR PREDICTIVE DETECTION OF AREAS OF SOLID FLOW DISCHARGE WITHIN WATER PROTECTION ZONES

ABSTRACT

The article considers the modern possibilities of GIS technologies for monitoring the state of the soil cover and water erosion processes. The possibilities of using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess various types of vegetation cover are shown. The substantiation of the choice of a key site, which includes both water protection zones and landscape positions associated with them in terms of material and energy flows, is presented. A method for obtaining a vector layer of NDVI values calculated from 9 Sentinel-2 satellite images for the period from March to November 2021 is presented. NDVI values are classified and the cells of the vector layer are combined into classes. Methods for obtaining rasters (with formula reduction) of the Topographical Wetness Index (TWI) and the Stream Power Index (SPI) on the territory of a key area are presented. The vector layer of NDVI values was compared with the TWI and SPI rasters, as well as with the average daily air temperature values. The dynamics of NDVI values for March–November 2021 is shown in the key area, a schematic map of the vector layer of NDVI values, ranked by class, is shown. The calculation of the ratio of areas of different classes in the key area was carried out. Topographical Wetness Index (TWI) and Stream Power Index (SPI) rasters are shown. Examples of queries to databases of layers obtained as a result of intersection of vector layers are given: TWI and NDVI, SPI and NDVI. Schematic maps have been obtained based on a combination of NDVI, TWI, SPI values, showing potentially erosion-hazardous areas. When comparing the average daily air temperature values with the average NDVI values, it was found that the correlation between them is 0.89. Possible measures aimed at reducing the environmental load on the water protection zone are proposed.

KEYWORDS: NDVI, TWI, SPI, water protection zones, erosion risk assessment

ВВЕДЕНИЕ

Водная эрозия – это процесс разрушения верхнего слоя почвенного покрова, причинами которого являются выпадение осадков, таяние снега. Вымывание водными потоками органических и неорганических частиц из поверхности грунта приводит к их переносу на территории с более низкими высотами, в результате чего могут возникать наводнения и подтопления. Перенос вымытых частиц сопровождается образованием новых грунтов или оседанием в водоемах и водотоках. Водная эрозия приносит ущерб, который выражается в снижении плодородия почвы, в загрязнении водных ресурсов. В связи с этим необходима организация мониторинга почвенного покрова с целью выявления и исследования процессов водной эрозии и использования этих данных в противоэрозионном и водоохранном обустройстве агроландшафтов [Lisetskii, 2019]. Исследования по разработке и внедрению концепции бассейнового природопользования в Белгородской области [Lisetskii et al., 2014; Buryak et al., 2022] позволили провести параметризацию и типологию 188 речных бассейнов и предложить адаптированные комплексы почвоводоохранных мероприятий, нацелен-

¹ Belgorod National Research University, Institute of Earth Sciences, Pobedy str., 85, 308015, Belgorod, Russia;
e-mail: poletaev@bsu.edu.ru

ные в конечном итоге на снижение темпов деградации гидрографической сети и заиления речных русел.

В настоящее время многие задачи, связанные с мониторингом почв и водной эрозией, эффективно решаются при использовании ГИС-технологий. Для сбора, систематизации, хранения, обработки, анализа и отображения информации используются геоинформационные системы (ГИС). ГИС, направленной на изучение эрозионных процессов, является, например, овражно-эрозионная геоинформационная система (ОЭГИС) [Григорьев, Рысин, 2017]. С помощью ГИС-технологий проводится расчет смыва почвы [Смирнова и др., 2012], оценивается эрозионная опасность [Буряк, 2014]. Использование ГИС-технологий подразумевает работу с различными источниками пространственной информации, среди которых важное значение имеют спутниковые снимки, аэрофотоснимки. С их помощью можно проводить, например, оценки водно-эрозионных потерь почвы, эродированности почв [Ganasri, Ramesh, 2016; Buryak, Marinina, 2020] и развития линейной эрозии [Лисецкий, Марциневская, 2009], анализ противоэрозионного обустройства агроландшафтов [Ковалева, Лисецкий, 2012].

Преимуществом использования снимков (полученных, к примеру, со спутников серии Landsat, MODIS, Sentinel-2) является возможность проведения спектрального анализа. В результате операций с разными спектральными диапазонами данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) рассчитывается ряд вегетационных индексов, таких как NDVI, EVI, GNDVI, CVI. В настоящее время, пожалуй, самым популярным индексом, используемым для оценки растительности, является нормализованный разностный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI). Он используется как для выражения состояния растительности, так и для ее количественных характеристик [Huang et al., 2021]. Например, индекс NDVI используется для изучения состояния посевов сельскохозяйственных культур [Терехин, 2015], распознавания залежных земель [Терехин, 2017], оценки состояния лесных насаждений [Оплетаев и др., 2019]. NDVI используется также для расчета С-фактора [Савельева, Каличкин, 2021] в универсальном уравнении потери почвы (Universal Soil Loss Equation, USLE) [Gitas et al., 2009; Mukharamova et al., 2021].

NDVI, вычисленный по серии разновременных снимков Sentinel, позволяет оценить влияние водной эрозии на растительный покров [Мудрых и др., 2020]. Наличие растительности, в особенности на склонах средней и высокой крутизны уклона, уменьшает воздействие водной эрозии на почвенный покров, что достигается путем закрепления грунта корневой системой. Этим обусловлена актуальность изучения динамики NDVI растительности, расположенной в водоохранных зонах рек.

Цель исследования состояла в выявлении с использованием ГИС технологических решений по территориальному выделению потенциально эрозионно-опасных участков (на примере водоохранной зоны р. Нежеголь) для объективного обоснования границ ареалов поступления твердого стока со склоновой ландшафтной подсистемы, позиционно связанной с поймой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данное исследование включает в себя следующие этапы.

Предварительный этап. Выбор ключевого участка. Поиск ключевого участка проводили в пределах водоохранной зоны р. Нежеголь в границах г. Шебекино Белгородской области. Так как р. Нежеголь имеет длину более 50 км, ширина водоохранной зоны составляет 200 м в соответствии с Водным Кодексом РФ

(Статья 65. Водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы)¹. В ключевой участок должна входить как водоохранная зона, так и территория за пределами водоохранной зоны. Причем территории необходимо иметь значительный уклон в направлении к р. Нежеголь и на ней должны присутствовать признаки водно-эрозионных процессов. Для этого в ПО ArcGIS с помощью инструмента «Уклон» (“Slope”) был получен производный от ЦМР растровый слой, характеризующий величину уклона в градусах. Ключевым был признан участок, расположенный по правому берегу р. Нежеголь, на котором отчетливо видны признаки активных водно-эрозионных процессов на меловых склонах. Растровый слой уклонов был обрезан с запада по границе лесного массива, с остальных сторон – по границе жилой застройки. На данном ключевом участке представлены склоны величиной от 0.7 до 17.5°, преобладают склоны средней крутизны (8–15°), согласно классификации Г.И. Рычагова [Рычагов, 2006], в северной части присутствуют крутые склоны с уклоном поверхности более 15° (рис. 1).

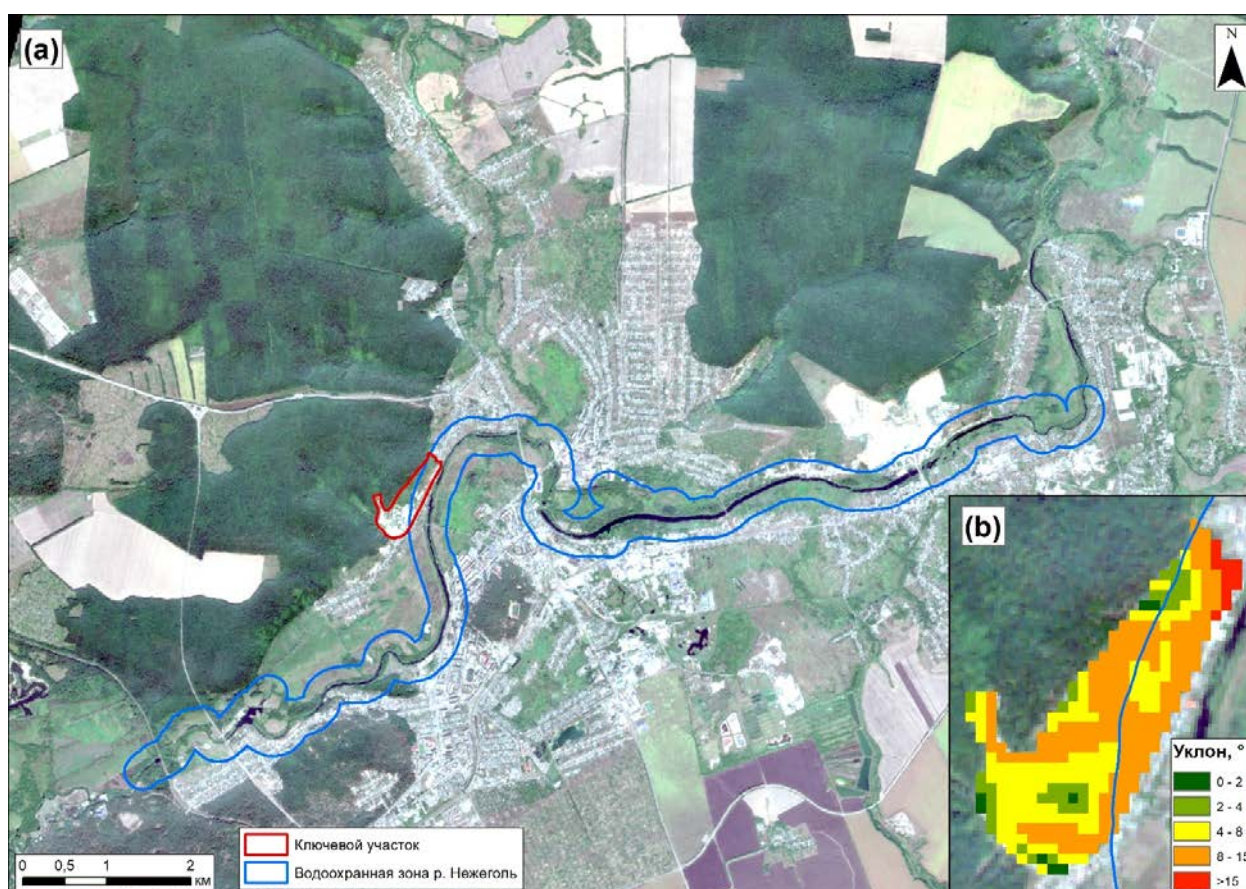


Рис. 1. Спутниковый снимок Sentinel-2 г. Шебекино от 26.08.2021 (а) и ключевой участок (показан растр уклонов), захватывающий водоохранную зону р. Нежеголь (б)

Fig. 1. Sentinel-2 satellite image from August 26, 2021 of Shebekino (a) and the key area (slope raster is shown), covering the water protection zone of the river Nezhegol (b)

¹ ВК РФ Статья 65. Водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы. Электронный ресурс: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/4c65ff0f232195d8dccc08535d2c3923d5b67f1c/ (дата обращения 19.01.2022).

Этап 1. Работа со спутниковыми снимками. В качестве исходных спутниковых снимков использовались снимки Sentinel-2, загруженные с сайта Геологической службы США¹ с отсутствием облачности за период с марта по ноябрь 2021 г. (всего 9 снимков, по 1 на каждый месяц: 04.03.2021, 06.04.2021, 16.05.2021, 20.06.2021, 20.07.2021, 26.08.2021, 15.09.2021, 18.10.2021, 17.11.2021, охватывающих территорию ключевого участка). С помощью ПО Snap на основе данных спутниковых снимков были созданы растры NDVI, которые затем были обрезаны по границе ключевого участка. При создании растров NDVI использовалось пространственное разрешение 10 м.

Этап 2. Создание векторного слоя значений NDVI. Для создания данного слоя, содержащего значения NDVI, рассчитанные по 9-ти спутниковым снимкам, была создана сетка в виде полигонального слоя, полностью покрывающая территорию ключевого участка. Ячейки сетки, представляющие собой полигоны, полностью совпадают в пространстве с ячейками растров NDVI. Значения NDVI были присоединены к атрибутивной таблице сетки, а затем с помощью запросов сделаны выборки, которые были объединены в классы. На рисунке 2 показан фрагмент таблицы атрибутов векторного слоя значений NDVI.

FID	Shape	Id	P04032021	P06042021	P16052021	P20062021	P20072021	P26082021	P15092021	P18102021	P17112021	Class
0	Polygon	0	0,118386	0,197013	0,513301	0,610015	0,563645	0,493734	0,552807	0,232	0,36872	3
1	Polygon	0	0,127168	0,204905	0,454106	0,575059	0,539724	0,456401	0,472153	0,213153	0,336018	4
2	Polygon	0	0,137714	0,16	0,381787	0,478276	0,422053	0,398483	0,353774	0,148782	0,227873	5
3	Polygon	0	0,141504	0,18232	0,366832	0,498832	0,483037	0,391459	0,347234	0,158184	0,234116	5
4	Polygon	0	0,152125	0,164515	0,371532	0,597885	0,554987	0,427063	0,386944	0,148914	0,21746	4
5	Polygon	0	0,154003	0,158012	0,39559	0,60573	0,563636	0,42182	0,404821	0,174603	0,237726	3
6	Polygon	0	0,157511	0,157355	0,487664	0,568845	0,494698	0,388235	0,385737	0,183892	0,291418	4

Рис. 2. Фрагмент таблицы атрибутов векторного слоя значений NDVI
 Fig. 2. A fragment of the table of attributes of the vector layer of NDVI values

Этап 3. Создание растров топографического индекса влажности (Topographical Wetness Index, TWI) и индекса мощности потока (Stream Power Index, SPI). Данные растры были созданы на основе цифровой модели рельефа (SRTM DEM) пространственного разрешения 30 м.

Индекс TWI отображает потенциальную влажность водосбора и представляет собой натуральный логарифм отношения дренажной площади к тангенсу крутизны склона (1) [Глотов, 2013]:

$$TWI = \ln[A/\tan(\beta)], \tag{1}$$

где A – удельная водосборная площадь, β – топографический градиент.

Низкие значения индекса TWI соответствуют области с самым крутым уклоном, а более высокие значения индекса TWI представляют области с повышенным накоплением влаги в почве [Дуброва и др., 2021].

¹ EarthExplorer. Электронный ресурс: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 19.01.2022).

Индекс SPI используется для оценки степени проявления и развития эрозии. Чем больше значения индекса, тем выше вероятность развития эрозионных процессов [Павлова, 2016].

Индекс SPI определяется по формуле (2) [Moore et al., 1991]:

$$SPI = A \times \tan(\beta), \quad (2)$$

где A – удельная водосборная площадь, β – угол наклона земной поверхности.

Для вычисления индекса TWI были предварительно получены растры направления стока (с помощью инструмента “*Flow Direction*”) и суммарного стока (с помощью инструмента “*Flow Accumulation*”). Растровый слой уклонов со значениями в градусах был пересчитан в слой со значениями в радианах путем умножения с помощью калькулятора растров исходного слоя на число 0.0174533 ($1^\circ = 0.0174533$ рад). Был вычислен растр тангенса уклонов через формулу: $\text{Con}(\text{“Slope_rad”} > 0, \text{Tan}(\text{“Slope_rad”}), 0.00565)$, с помощью которой нулевые значения пикселей заменяются на число 0.00565, являющееся тангенсом уклона, близкого к нулевому. Это необходимо для избегания получения пикселей с неопределенными значениями, т. к. тангенс нуля радиан равен нулю. Проведено масштабирование раstra суммарного стока (FlowAcc) с помощью формулы “(FlowAcc + 1) * 29.95123105”, где число 29.95123105 – размер ячейки раstra. Добавление числа 1 необходимо, так как граничные пиксели имеют нулевое значение накопления потока. Иначе водоразделы, не имеющие аккумуляирования стока, будут иметь нулевое значение, а $\ln(0)$ будет неопределенным. Итоговый растр индекса TWI был получен с помощью формулы: $\text{Ln}(\text{“FlowAcc_scaled”}/\text{“tan_slope”})^1$, где FlowAcc_scaled – масштабированный растр суммарного стока, tan_slope – растр тангенса уклонов. Для вычисления индекса SPI была использована следующая формула: $\text{Ln}(\text{“FlowAcc”} + 0.001) * ((\text{“Slope_”}/100) + 0.001)^2$, где FlowAcc – растр суммарного стока, Slope_% – растр уклонов, пересчитанный из градусов в %.

Этап 4. Сопоставление векторного слоя значений NDVI с растрами TWI и SPI.

Данный этап был необходим для выявления возможной взаимосвязи между значениями NDVI и растрами топографического индекса влажности и индекса мощности потока. Для этого растры были сконвертированы в векторный формат и затем с помощью инструмента “Пересечение” (“*Intersect*”) как векторный слой TWI, так и векторный слой SPI, были пересечены с векторным слоем значений NDVI.

Этап 5. Сопоставление значений NDVI с усредненными среднесуточными значениями температуры воздуха. На основании данных архива погоды (интернет-ресурс «Погода и климат»³) для г. Белгород, где находится ближайшая к г. Шебекино метеостанция, были сопоставлены усредненные среднесуточные значения температуры воздуха со средними значениями NDVI.

¹ Topographic Wetness Index TWI Calculation with Detail Explanation. Электронный ресурс: <https://exploregistutortials.blogspot.com/2021/08/topographic-wetness-index-twi.html> (дата обращения 19.01.2022).

² Stream Power Index SPI calculation in ArcGIS (Detail Explanation). Электронный ресурс: <https://exploregistutortials.blogspot.com/2021/08/stream-power-index-spi-calculation-in.html> (дата обращения 19.01.2022).

³ Архив погоды в Белгороде. Электронный ресурс: <http://pogodaiklimat.ru/weather.php?id=34214> (дата обращения 27.01.2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внутрисезонная динамика значений NDVI за март–ноябрь 2021 г. на ключевом участке показана на рисунке 3. Созданный в ходе второго этапа данного исследования векторный слой значений NDVI представлен на рисунке 4. Соответствие классов диапазонам максимальных значений NDVI указано в таблице. Соответствие каждой ячейки векторного слоя значений NDVI определенному классу означает, что наибольшие значения NDVI данной ячейки не выходят за рамки соответствующего диапазона.

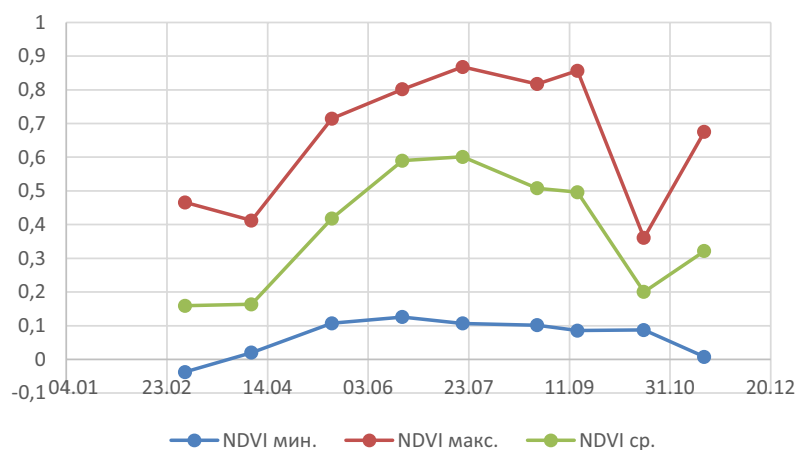


Рис. 3. Внутрисезонная динамика значений NDVI за 2021 г. на ключевом участке
 Fig. 3. Intraseasonal dynamics of NDVI values for 2021 in the key area

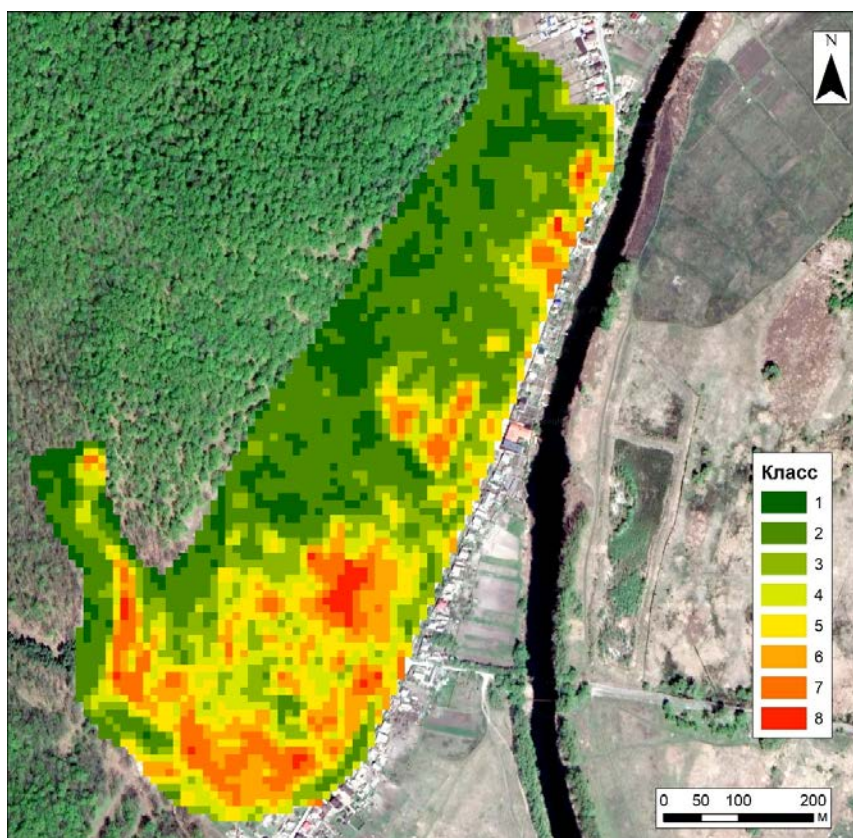


Рис. 4. Карта-схема векторного слоя значений NDVI, ранжированного по классам
 Fig. 4. Schematic map of the vector layer of NDVI values, ranked by classes

Табл. Соответствие классов диапазонам максимальных значений NDVI
 Table. Compliance of classes with ranges of maximum NDVI values

Класс	Диапазон максимальных значений NDVI
1	0.8–0.9
2	0.7–0.8
3	0.6–0.7
4	0.5–0.6
5	0.4–0.5
6	0.3–0.4
7	0.2–0.3
8	<0.2

Исходя из данных рисунка 4 и таблицы, можно предположить, что наиболее подвержены водной эрозии будут участки, соответствующие ячейкам векторного слоя значений NDVI с диапазоном максимальных значений NDVI, относящихся к 7 и 8 классам, т.е. те участки, на которых за весь наблюдаемый период с марта по ноябрь 2021 г. значение NDVI не превышает 0.3. Данная величина была выбрана как округленное значение NDVI для открытой почвы (0.025). На рисунке 5 представлено соотношение площадей разных классов, суммарно площадь участков 7 и 8 класса не превышает 7 %.

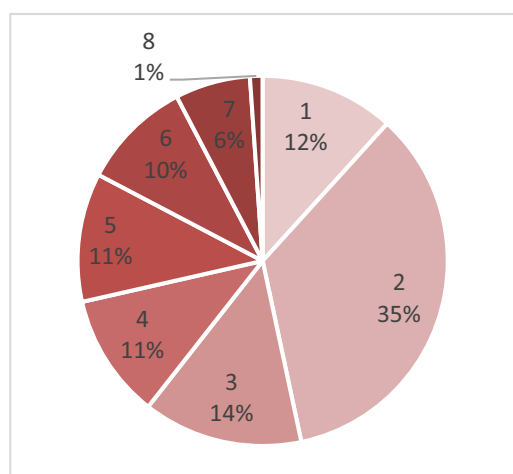


Рис. 5. Отношение территории каждого из классов к общей площади ключевого участка
 Fig. 5. The ratio of the territory of each of the classes to the total area of the key area

На рисунке 6 представлены результаты выполнения третьего этапа работ: растр топографического индекса влажности и растр индекса мощности потока.

В ходе выполнения четвертого этапа работ после пересечения векторных слоев TWI и SPI с векторным слоем значений NDVI (создано 2 слоя пересечения векторных слоев: TWI и NDVI, SPI и NDVI) были составлены запросы к таблице атрибутов для выборки участков, соответствующим классам 7 и 8 векторного слоя значений NDVI и низким значениям TWI (соответствие областям с самым крутым уклоном), классам 7 и 8 векторного слоя значений NDVI и высоким значениям SPI (высокая вероятность развития эрозионных процессов).

Были созданы следующие запросы для выборки:

Для TWI: (“Class”=7 OR “Class”=8) AND “TWI” <6; (“Class”=7 OR “Class”=8) AND “TWI” <7; (“Class”=7 OR “Class”=8) AND “TWI” <8.

Для SPI: ("Class"=7 OR "Class"=8) AND "SPI" >2; ("Class"=7 OR "Class"=8) AND "SPI" >0; ("Class"=7 OR "Class"=8) AND "SPI" >-2.

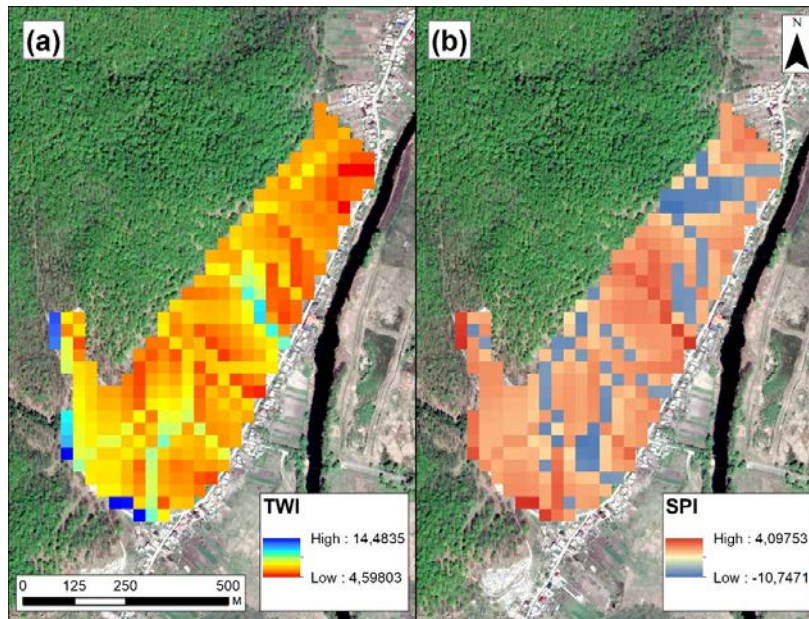


Рис. 6. Растр топографического индекса влажности (TWI) (a) и растр индекса мощности потока (SPI) (b)

Fig. 6. Topographic Moisture Index (TWI) raster (a) and Stream Power Index (SPI) raster (b)

На основе составленных запросов были получены карты-схемы, сформированные на комбинации значений NDVI, TWI, SPI, показывающие потенциально эрозионно-опасные участки (рис. 7).

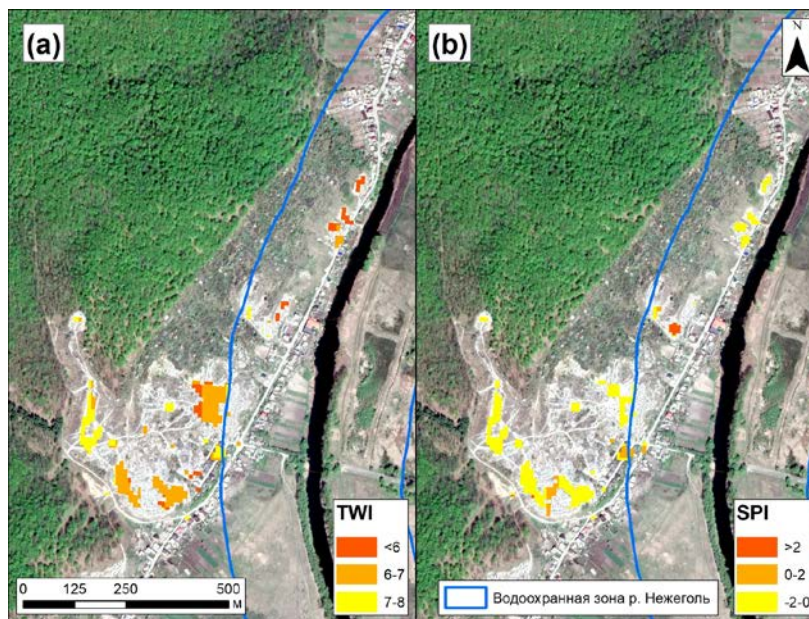


Рис. 7. Карты-схемы потенциально эрозионно-опасных участков, основанных на комбинации значений NDVI и TWI (a), NDVI и SPI (b)

Fig. 7. Schematic maps of potentially erosion-hazardous areas based on a combination of NDVI and TWI (a), NDVI and SPI (b) values

На рисунке 7 показана водоохранная зона р. Нежеголь, где потенциально эрозионно-опасные участки располагаются как внутри водоохранной зоны, так и за ее пределами на расстоянии до 350 м от границы водоохранной зоны (внешний вид участков представлен на рисунке 8). В результате, при выпадении значительного количества осадков ливневого типа, а также при таянии снежного покрова, с данных участков возможен вынос почвогрунтов и поступление их на территорию водоохранной зоны. В связи с этим принятие мер по увеличению растительного покрова на потенциально эрозионно-опасных участках может снизить экологическую нагрузку на водоохранную зону. Расширение в данном месте границы водоохранной зоны позволило бы взять на контроль воздействие негативных процессов, оказывающих на нее влияние.

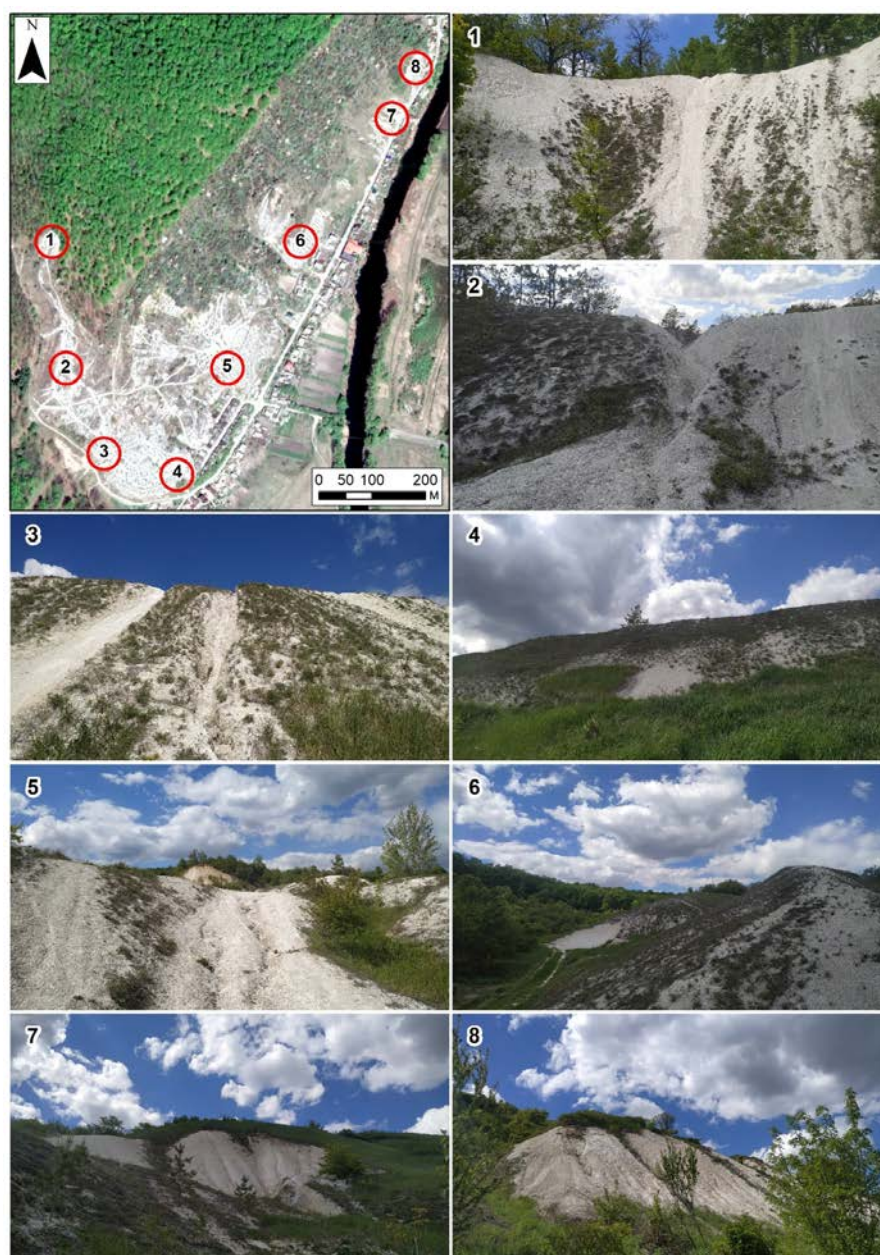


Рис. 8. Карта-схема потенциально эрозионно-опасных участков и их внешний вид (фото автора)

Fig. 8. Schematic map of potentially erosion-hazardous areas and their appearance (photo by the author)

В ходе выполнения пятого этапа работ была выявлена зависимость между средними значениями NDVI и усредненными среднесуточными значениями температуры воздуха (рис. 9). Корреляция между данными величинами оказалась очень высокой (0.89). Возможно, это обусловлено тем, что среднесуточные температуры были оптимальными для роста и развития растений, как в период активной вегетации, так и в остальные стадии жизненного цикла растений. За период с 06.04.2021 по 17.11.2021 максимальная среднесуточная температура составила 28.1°C.

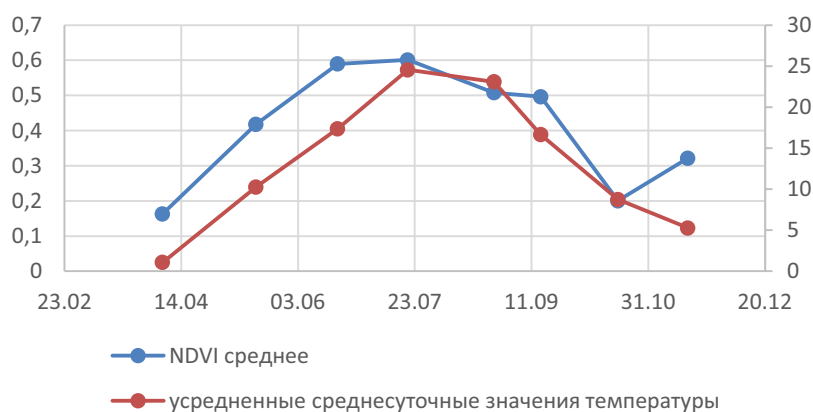


Рис. 9. График зависимости между средними значениями NDVI и усредненными среднесуточными значениями температуры

Fig. 9. Graph of relationship between mean NDVI values and average daily temperature values

ВЫВОДЫ

В ходе данной работы была показана возможность совместного использования индексов NDVI, вычисленных по разновременным спутниковым снимкам Sentinel-2 (пространственное разрешение – 10 м), и индексов TWI, SPI, рассчитанных на основе ЦМР 30-метрового разрешения (SRTM DEM) для объективного обоснования границ ареалов поступления твердого стока с позиционно связанной с поймой склоновой ландшафтной подсистемы (на примере участка водоохранной зоны р. Нежеголь и прилегающей к ней территории (в границах г. Шебекино)). Выявление потенциально эрозионно-опасных участков на территориях, граничащих с водоохранными зонами, имеет важное значение при планировании и проведении водоохраных мероприятий, а также при возможной корректировке границ водоохранных зон.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 20-67-46017.

ACKNOWLEDGEMENTS

The reported research was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 20-67-46017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буряк Ж.А. Совершенствование подходов к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием ГИС-технологий. Региональные геосистемы. 2014. Т. 29. № 23 (194). С. 140–146.
2. Глотов А.А. Использование ЦМР для эффективного управления природопользованием. Геоматика. 2013. № 4. С. 32–36.
3. Григорьев И.И., Рысин И.И. Создание и использование овражно-эрозионной геоинформационной системы. Материалы II-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной Году экологии и 55-летию высшего географического образования в Удмуртской Республике «Проблемы региональной экологии и географии», Ижевск, 9–13 октября 2017 г. С. 278–282.
4. Дуброва Ю.Н., Мыслыва Т.Н., Ткачева Т.Н. Геоморфометрический анализ рельефа территории Горецкого района с использованием данных дистанционного зондирования. Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1. С. 209–216.
5. Ковалева Т.Н., Лисецкий Ф.Н. Землеустройство агроландшафтов Приволжской возвышенности с применением современных программных средств и данных космического мониторинга. Региональные геосистемы. 2012. Т. 19. № 9 (128). С. 166–172. 2012.
6. Лисецкий Ф.Н., Марциневская Л.В. Оценка развития линейной эрозии и эродированности почв по результатам аэрофотосъемки. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2009. № 10. С. 39–43.
7. Мудрых Н.М., Самофалова И.А., Чащин А.Н. Прогнозирование эрозионных потерь почвы с использованием модели RUSLE. АгроЭкоИнфо. 2020. № 4. С. 1–16.
8. Оплетев А.С., Жигулин Е.В., Косов В.А. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях. Леса России и хозяйство в них. 2019. № 3 (70). С. 15–23.
9. Павлова А.И. Применение методов цифрового моделирования рельефа для картографирования эрозионных земель. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2016. № 2 (74). С. 159–169. DOI: 10.12731/wsd-2016-2-12.
10. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. М.: Наука, 2006. 416 с.
11. Савельева Д.А., Каличкин В.К. Внутрисезонный мониторинг водной эрозии почв пашни в подтайге Западной Сибири. Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 5. С. 15–21. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10502.
12. Смирнова Л.Г., Нарожняя А.Г., Шамарданова Е.Ю. Сравнение двух методов расчета смыва почвы на водосборах с применением ГИС-технологий. Достижения науки и техники АПК. 2012. № 9. С. 10–12.
13. Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур. Исследование Земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31. DOI: 10.7868/S0205961415010108.
14. Терехин Э.А. Распознавание залежных земель на основе сезонных значений вегетационного индекса NDVI. Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 719–725. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-719-725.
15. Buryak Z., Lisetskii F., Gusarov A., Narozhnyaya A., Kitov M. Basin-Scale Approach to Integration of Agro-and Hydroecological Monitoring for Sustainable Environmental Management: A Case Study of Belgorod Oblast, European Russia. Sustainability (Switzerland). 2022. Vol. 14. No. 2. P. 927. DOI: 10.3390/su14020927.
16. Buryak Z., Marinina O. Using GIS technology for identification of agricultural land with an increased risk of erosion. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 176. P. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202017604007.

17. *Ganasri B.P., Ramesh H.* Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS – A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 953–961. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.10.007.
18. *Gitas I.Z., Douros K., Minakou C., Silleos G.N., Karydas C.G.* Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSel eProceedings*. 2009. Vol. 8. No. 1. P. 40–52.
19. *Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G.* A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 32. P. 1–6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
20. *Lisetskii F.N.* Estimates of Soil Renewal Rates: Applications for Anti-Erosion Arrangement of the Agricultural Landscape. *Geosciences*. 2019. Vol. 9. No. 6. P. 266. DOI: 10.3390/geosciences9060266.
21. *Lisetskii F.N., Zemlyakova A.V., Terekhin E.A., Naroznyaya A.G., Pavlyuk Y.V., Ukrainskii P.A., Kirilenko Z.A., Marinina O.A., Samofalova O.M.* New opportunities of geoplanning in the rural area with the implementing of geoinformational technologies and remote sensing. *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8. No. 10. P. 536–539.
22. *Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R.* Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*. 1991. Vol. 5. P. 3–30. DOI: 10.1002/hyp.3360050103.
23. *Mukharamova S., Saveliev A., Ivanov M., Gafurov A., Yermolaev O.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European part of Russia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10. No. 10. P. 645. DOI: 10.3390/ijgi10100645.

REFERENCES

1. *Buryak Z., Lisetskii F., Gusarov A., Narozhnyaya A., Kitov M.* Basin-Scale Approach to Integration of Agro-and Hydroecological Monitoring for Sustainable Environmental Management: A Case Study of Belgorod Oblast, European Russia. *Sustainability (Switzerland)*. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 927. DOI: 10.3390/su14020927.
2. *Buryak Z., Marinina O.* Using GIS technology for identification of agricultural land with an increased risk of erosion. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 176. P. 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202017604007.
3. *Buryak Zh.A.* Improvement of approaches to assessing the risk of erosion in agricultural landscapes using GIS technology. *Regional Geosystems*. 2014. Vol. 29. No. 23 (194). P. 140–146 (in Russian).
4. *Dubrova Yu.N., Myslyva T.N., Tkacheva T.N.* Geomorphometric analysis of the relief of the territory of the Gorki district using remote sensing data. *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2021. No. 1. P. 209–216 (in Russian).
5. *Ganasri B.P., Ramesh H.* Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS – A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 953–961. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.10.007.
6. *Gitas I.Z., Douros K., Minakou C., Silleos G.N., Karydas C.G.* Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model. *EARSel eProceedings*. 2009. Vol. 8. No. 1. P. 40–52.
7. *Glotov A.A.* The use of DEM for effective environmental management. *Geomatics*. 2013. No. 4. P. 32–36 (in Russian).
8. *Grigoriev I.I., Rysin I.I.* The creation and use of gully-erosion geoinformation system. *Proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the Year of Ecology and the 55th anniversary of higher geographical*

- education in the Udmurt Republic “Problems of regional ecology and geography”, Izhevsk, October 9–13. 2017. P. 278–282 (in Russian).
9. *Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G.* A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 32. P. 1–6. DOI: 10.1007/s11676-020-01155-1.
 10. *Kovaleva T.N., Lisetsky F.N.* Land management of agrolandscapes of Volga Upland using modern software tools and data of space monitoring. *Regional geosystems*. 2012. Vol. 19. No. 9 (128). P. 166–172 (in Russian).
 11. *Lisetskii F.* Estimates of Soil Renewal Rates: Applications for Anti-Erosion Arrangement of the Agricultural Landscape. *Geosciences*. 2019. Vol. 9. No. 6. P. 266. DOI: 10.3390/geosciences9060266.
 12. *Lisetskii F.N., Zemlyakova A.V., Terekhin E.A., Naroznyaya A.G., Pavlyuk Y.V., Ukrainskii P.A., Kirilenko Z.A., Marinina O.A., Samofalova O.M.* New opportunities of geoplanning in the rural area with the implementing of geoinformational technologies and remote sensing. *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8. No. 10. P. 536–539.
 13. *Lisetsky F.N., Martsinevskaya L.V.* Assessment of development of linear erosion and soil erosion as a result of aerial photo shooting. *Land management, cadastre and land monitoring*. 2009. No. 10. P. 39–43 (in Russian).
 14. *Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R.* Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*. 1991. Vol. 5. P. 3–30. DOI: 10.1002/hyp.3360050103.
 15. *Mudrykh N.M., Samofalova I.A., Chashchin A.N.* Forecasting soil erosional losses using the RUSLE model. *AgroEcoInfo*. 2020. No. 4. P. 1–16 (in Russian).
 16. *Mukharamova S., Saveliev A., Ivanov M., Gafurov A., Yermolaev O.* Estimating the soil erosion cover-management factor at the European part of Russia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10. No. 10. P. 645. DOI: 10.3390/ijgi10100645.
 17. *Opletaev A.S., Zhigulin E.V., Kosov V.A.* Using the NDVI vegetation index to assess the state of forest plantations on disturbed land. *Forests of Russia and economy in them*. 2019. No. 3 (70). P. 15–23 (in Russian).
 18. *Pavlova A.I.* Application of digital elevation modeling methods for mapping eroded lands. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2016. No. 2 (74). P. 159–169 (in Russian). DOI: 10.12731/wsd-2016-2-12.
 19. *Rychagov G.I.* General geomorphology. Moscow: Nauka, 2006. 416 p. (in Russian).
 20. *Savelyeva D.A., Kalichkin V.K.* Intraseasonal monitoring of water erosion of arable soils in subtaiga of Western Siberia. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2021. Vol. 35. No. 5. P. 15–21. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10502 (in Russian).
 21. *Smirnova L.G., Narozhnaya A.G., Shamardanova E.Yu.* Comparison of two methods of soil ablation calculation in catchments with GIS technology. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2012. No. 9. P. 10–12 (in Russian).
 22. *Terekhin E.A.* Estimation of seasonal NDVI values for the detection and analysis of crop conditions. *Earth Observation and Remote Sensing*. 2015. No. 1. P. 23–31. DOI: 10.7868/S0205961415010108 (in Russian).
 23. *Terekhin E.A.* Recognition of abandoned agricultural lands using seasonal NDVI values. *Computer Optics*. 2017. Vol. 41. No. 5. P. 719–725. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-719-725 (in Russian).