

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

КАФЕДРА ПОЧВОВЕДЕНИЯ

Направление (специальность): 06.03.02 – Почвоведение

Профиль: Управление качеством почв и биотехнология

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ОЦЕНКА ЭРОДИРОВАННОСТИ ПАХОТНЫХ УГОДИЙ С ПОМОЩЬЮ
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Студент 4 курса
группы 02-608

«___» 2020 г.

(Осипова К.А.)

Научный руководитель
к.б.н., доцент

«___» 2020 г.

(Иванов Д.В.)

Заведующая кафедрой почвоведения
к.б.н., доцент

«___» 2020 г.

(Смирнова Е.В.)

Казань – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	5
1.1. Виды эрозии	5
1.2. Влияние эрозионных процессов на почвенные свойства	7
1.3. Методы оценки эрозионных процессов.....	9
1.4. Методы оценки эрозионных процессов по рельефным данным	12
1.5. Методы оценки эрозионных процессов по данным дистанционного зондирования.....	16
2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ.....	21
2.1. Объект исследования	21
2.2. Данные дистанционного зондирования	22
2.3. Методы исследования.....	23
2.4. Влияние топографического фактора эрозионности на светлоту почвенного покрова	27
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ	29
3.1. Классификация типов земного покрова.....	29
3.2. Рельефные параметры почвенного покрова	32
3.3. Влияние топографических факторов	35
ВЫВОДЫ.....	38
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	39

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изучения и предотвращения развития эрозионных процессов уже на протяжении длительного времени волнует общество. Мониторинг изменения форм рельефа и эрозионных процессов является необходимым условием успешного решения задач длительного планирования и устойчивого развития регионов с крупной аграрной и промышленной инфраструктурой (Нугманов и др., 2013).

Эрозия – это разрушение горных пород и почв поверхностными водными потоками и ветром. В данной работе рассматривался один из видов водной эрозии – плоскостная, как наиболее встречаемая на сельскохозяйственных угодьях.

Проведению быстрого и результативного мониторинга агроландшафтов способствует использование геоинформационных систем (ГИС). Геоинформационные системы в сочетании с данными дистанционного зондирования (ДДЗ) способны моделировать процессы, связанные с переносом в пространстве веществ и энергии. Пространственный ГИС-анализ позволяет создавать цифровые модели рельефа (ЦМР) для более точного и существенного мониторинга данного пространства земли (Кобзарь, 2017). Актуальность данной работы состоит в том, что использование современных технологий позволяет дистанционно получать спутниковые данные, с помощью которых можно выявить особенности микрорельефа, сделать прогноз о степени эродированности, формировании временных водотоков в результате эрозионной деятельности, а также выявить возможные причины эрозии участка.

Работая с космоснимками и ГИС-технологиями можно проследить за развитием деградационных процессов почвы, заниматься управлением и ведением многоразового мониторинга сельскохозяйственной деятельности и т.д. без привлечения большого объёма бюджетных и трудовых ресурсов. Опираясь на всё вышеперечисленное, важно понять как геоинформационные

системы и данные дистанционного зондирования позволяют дать оценку плоскостной эрозии сельскохозяйственных полей.

Цель работы: дать оценку эрозионным процессам, протекающим на сельскохозяйственных угодьях с помощью цифровой модели рельефа и данных дистанционного зондирования.

Задачи:

1. Произвести классификацию типов земного покрова исследуемой территории по данным дистанционного зондирования Земли;
2. Оценить эрозионную опасность для земель с открытым почвенным покровом;
3. Оценить влияние топографических факторов эрозионной опасности на значения отражательной способности почвенного покрова.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Виды эрозии

На современном этапе развития человечества резко возросло техногенное воздействие на почву. Распашка больших территорий, сельскохозяйственное освоение болотных почв, использование различных приемов мелиорации, строительство ирригационных систем, интенсивный выпас скота и прочие виды человеческой деятельности могут серьезно нарушать сложившиеся биосферные равновесия, приводя к отрицательным последствиям (Фокин, 1986; Аввакумова, Ермолаев, 2011). Почва является важным компонентом наземных биогеоценозов, мощным аккумулятором энергии на Земле, регулятором состава атмосферы и гидросферы, барьером для миграции загрязняющих веществ (Добровольский, Никитин, 1990). Этот незаменимый компонент подвергается значительной деградации, что приводит к снижению плодородия почв (Дербенцева, 2006).

Одним из таких разрушительных процессов является эрозия. Эрозия – это процесс разрушения почв и горных пород под воздействием ветра и стока воды. Эрозия оказывает негативное влияние на продуктивность почв, поэтому она особенно опасна для территорий, которые активно используются человеком в качестве сельскохозяйственных угодий. Существуют ветровая и водная эрозии; водная, в свою очередь, делится на поверхностную, линейную, естественную и антропогенную (Кобзарь, 2017).

Интенсивность эрозионных процессов зависит от сочетания рельефа, почвы, климата, растительности и агротехнологических условий. Среди них рельеф является главным фактором перераспределения материальных и энергетических потоков в ландшафте и выступает в качестве «основы» эрозионных процессов, определяющих их интенсивность. В условиях высокой расчлененности рельефа активно протекают процессы как поверхностного смыва, так и линейной эрозии почв (Буряк, 2014).

Существует множество видов эрозии, на склонах часто встречается плоскостная эрозия (смыв), образующаяся в результате потока талых и дождевых вод. Овражная эрозия развивается в процессе деятельности временных потоков, накапливающихся в бороздах, различных линейно-вытянутых понижениях (Лозовая, Лозовой, 2018).

Линейная эрозия – основная причина образования оврагов, которые наносят непоправимый ущерб сельскому хозяйству. К особым видам водной эрозии относятся береговая, речная и ирригационная (Скрипчинский, Бурым, 2016).

Важно отметить усиление влияния дефляционных процессов, обусловленных хозяйственной деятельностью человека. Процесс, в результате которого происходит нарушение верхних горизонтов почв под влиянием сильных ветров, называется – дефляция. Открытая добыча полезных ископаемых, вырубка лесных массивов и защитных лесных полос или их отсутствие, нерегулируемый выпас скота, применение необоснованных обработок почвы, частые механические воздействия на почву и оставление "открытых" полей без посевов, наряду с природными факторами, значительно усиливают деградацию почв (Рулев и др., 2016).

Эродирующая энергия способна выполнить разрушительную работу над почвой. Она возникает при падении воды на поверхность почвы, течении ее вниз по склону, больших скоростях ветра, при обработке почвы, интенсивном выпасе скота, механическом изъятии почвы для различных строительных целей и т.д. (Дербенцева, 2006).

Эрозия почв классифицируется также на нормальную (естественную) и ускоренную (антропогенную). Естественная определяется условиями климата и рельефа и протекает медленно. Антропогенная нарушается хозяйственной деятельностью человека и становится ускоренной.

При проведении почвенных обследований для определения степени эродированности почв рекомендуется использовать диагностические показатели, разработанные В.А. Носиным, Ю.В. Федориным и Т.А. Фриевым

(1973). Предложенная шкала используется при составлении паспорта почв и других видах исследования почв. По наличию в почвенном профиле не разрушенных эрозией генетических горизонтов почв определяется степень смывости (слабая, средняя, сильная). Например, к слабосмытым относятся почвы, на которых смыто не более половины горизонта А, хотя этот показатель зависит от типа обследуемой почвы (Шафигуллин и соавт., 2011).

В качестве критерия эрозионной опасности часто выбирают уклон местности. В связи с этим, А.Г. Тарарико (Тарарико, 1990) подразделяет земли на три группы, которые зависят от степени уклона:

I группа – земли, расположенные на равнинах и склонах до 3° , пригодные для размещения пропашных культур;

II группа – склоны от 3° до 7° с севооборотами зернотравяного типа;

III группа – склоны более 7° , рекомендованные к выводу из пашни и длительному залужению.

Также существует более разграниченная (Котлярова, 1995) система классификации пашни по степени эродированности почв и уклону: до 1° – несмытые почвы, $1-3^\circ$ – эрозионно-опасные, $3-5^\circ$ – слабосмытые, $5-8^\circ$ – средне- и сильносмытые.

1.2. Влияние эрозионных процессов на почвенные свойства

На развитие водной эрозии и дефляции большое влияние оказывают характер и состояние почвенного покрова: тип почвы и ее гранулометрический состав, структура и влажность, содержание гумуса и состав почвенного поглощающего комплекса. От свойств почвы зависят инфильтрационная способность и интенсивность эрозии (Чешев, Вальков, 2002).

Особенно вредна эрозия на пахотных землях, поскольку почва является важнейшим средством производства, источником сельскохозяйственной продукции; эрозия почв на участках пахотных земель приводит к уменьшению верхнего плодородного слоя почвы – гумусового горизонта, удалению из

почвы необходимых для растений основных элементов - азота, калия, фосфора и др. (Голубев, 2009).

Сокращение урожайности возделываемых культур, выращиваемых на эродированных почвах, происходит в следствии резкого снижения плодородия почв, ухудшения агрохимических, физико-химических, водно-физических и биологических свойств, что происходит также в результате размыва верхнего плодородного слоя почвы, потери гумуса, выноса питательных веществ. Исследованиями азербайджанских агрономов, было выявлено, что валовое содержание гумуса в слабоэродированных черноземах снижается на 10%, в средноэродированных на 45% и сильноэродированных на 65 %, что далее способствует уменьшению мощности почвы (Садыхов, 2015). По данным В. Поцукевич (1973), процесс эрозии приводит к вымыванию из верхних горизонтов почвы ряда валовых и подвижных форм микроэлементов. Основываясь на этом, автор советует применять микроэлементный состав в качестве показателя эродированности почв.

Установлено, что важнейшие для плодородия свойства ухудшаются по мере увеличения степени размыва почв – это проявляется в снижении содержания гумуса, увеличении или уменьшении рН-среды, накоплении содержания карбонатов, снижении микробиологической активности, ухудшении водно-химических свойств почв, в следствии чего на таких почвах происходит снижение урожайности возделываемых сельскохозяйственных культур (Садыхов, 2015).

Как отмечают большинство исследователей, интенсивность эрозии можно определить по крутизне склона, которая может считаться определяющей среди других морфологических показателей рельефа. Научными исследованиями установлено, что при увеличении крутизны склона от 2° до 3° эрозия почвы увеличивается примерно в 1,3 раза, а при увеличении крутизны склона на 1° урожайность сельскохозяйственных культур снижается на 1,4-1,7 ц / га, что указывает на то, что содержание макро - и микроэлементов в почве для хорошего урожая снижается в разы. По мере увеличения крутизны

с одновременным увеличением длины склона увеличивается количество текущей воды и увеличивается разрушительная энергия потока, что приводит к смыву с верхней части склонов плодородных слоев и их накоплению в нижней части (Чешев и Вальков, 2002).

Как и Чешев с Вальковым, Мансуров с соавторами пишет, что эрозия почвы влечет за собой снижение энергоемкости почвы и увеличение беспорядка (увеличение энтропии). Что также приводит к ряду последствий: потере гумуса, снижению микробиологической активности, сокращению доли вторичных алюмосиликатов (слюды, вермикулита, монтмориллонита), уменьшению структурного состава почв, снижению разнообразия почвенного профиля, уменьшению интенсивности миграции и концентрации химических элементов и сокращению экологических ниш (Мансуров и соавт., 2015).

Развитие эрозионных процессов во многом связано с условиями почвообразования, о чем пишут исследователи. Эрозия уменьшается при оглеении, осолонцевании, развитии дернового процесса и возрастает с развитием засоления (Седых и Савич, 2014).

1.3. Методы оценки эрозионных процессов

При оценке эрозионных процессов, протекающих в почвах целесообразно использовать показатель качества, учитывающий мощность гумусового горизонта, угол наклона рельефа местности, содержание органического вещества, уровень микробной биомассы в верхнем плодородном слое почвы и особенности растительного покрова. Для дальнейшего использования всех указанных параметров в качественном показателе, их значения были преобразованы в одномерные единицы измерения. Для этого значения каждого параметра рассчитываются в процентах от максимального значения. В результате получается, что большая деградация почв соответствует более низкому проценту емкости гумусового горизонта, микробной биомассы, содержания органического углерода и растительного покрова. Для параметра "угол наклона" полученное значение

вычитается из 100%, так как, в отличие от остальных четырех, его увеличение отрицательно, т. е. способствует усилению эрозионного процесса. Сумма полученных значений и есть интегральный показатель (Шафигуллин с соавт., 2011).

С.С. Соболев (1968) и М.Н. Заславский (1983) произвели районирование территории по отношению к общим площадям, занятым средне- и сильноэродированными почвами с использованием следующих шкал: 0-5%, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 и более 40% (по С.С. Соболеву); менее 10%, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 и более 50% (по М.Н. Заславскому).

В Почвенном институте им. В.В. Докучаева при составлении почвенно-эрозионной карты СССР масштаба 1: 2 500 000 применена шкала удельного веса эродированных и дефлированных почв в составе пахотных земель: 1,0-5,0% – очень слабая степень эродированности территории; 5,1-10,0 – слабая; 10,1-25,0 – средняя; 25,1-50,0 – сильная; более 50,0% – очень сильная степень эродированности территории (Литвин, 2002; Цыбулька, 2006).

Для оценки степени эродированности почв перспективно выделение градиентов содержания по профилю почв гумуса, азота, соотношения C:N, N:P (Мансуров и др., 2015). При оценке опасности развития эрозии следует дополнительно учитывать долю эродированных почв на территории, взаимосвязи в ландшафте, базис эрозии, почвообразующие породы, распределение биофильных элементов и гумуса, а также структуру почв и корневой массы по профилю почв.

В последние годы значительно возрос интерес к прямым методам количественной оценки смыва-намыва почвы, основанной на использовании определенных микрокомпонентов почвы, которые можно рассматривать как трассеры (или маркеры). Метод магнитного трассера применительно к задачам исследования эрозии почв был опробован в США около 20 лет назад, а в России – 10 лет назад (Геннадиев и соавт., 2002; Геннадиев с соавт., 2004; Olson et al. 2002). Метод магнитного трассера заключается в определении массы перераспределяемого, в результате эрозионных процессов, СМЧ

(сферических магнитных частиц), которая прямо пропорциональна массе перераспределяемого почвенного материала. Использование данного метода позволяет дать количественную характеристику эрозионных процессов, протекающих в почвах, рассчитать темпы эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах различной формы и экспозиции, дифференцировать различные участки склона, выявить параметры размыва почв, установить корреляцию между интенсивностью эрозии почв и другими свойствами почв, оценить влияние типа землепользования на скорость эрозионных процессов. (Геннадиев и соавт., 2010).

Эрозионный потенциал рельефа (ЭПР) является наиболее изменчивым фактором эрозии, что указывает на то, что среднее значение ЭПР дает лишь общий образ о рельефе существенных размеров. Более полная и практически ценная идея дает представление кривой распределения ЭПР, которая имеет левостороннюю асимметрию. Для гораздо больших территорий эта характеристика может быть получена путем измерения необходимых параметров уклона на крупномасштабных топографических картах с использованием точечного статистического метода (Литвин и Миргородская, 1976). Величина ЭПР определяется лишь длиной и крутизной склонов. Вместе с этим средние значения и распределение ЭПР зависят от избирательного земледельческого освоения пахотных территорий (Ларионов, 1991).

$$R = L^a \cdot [n^{(1+a)} - (n-1)^{(1+a)}] i_n^{1,45}, \quad (1)$$

L – длина отрезка, м;

a – показатель степени при длине (табл. 1);

n – порядковый номер отрезка;

i_n – уклон на отрезке, %.

Таблица 1

Зависимость показателя степени a от уклона
(Корпоративный портал ТПУ)

Уклон, %	Менее 1,0	1,1-3,5	3,5-5,0	Более 5,0
a	0,2	0,3	0,4	0,5

Ключевым и традиционным методом расчета водной эрозии является схема, придуманная Американскими учеными. Для количественной оценки интенсивности водной эрозии используется величина потенциального смыва, представляющая собой модуль смыва почвы в условиях чистого пара, выраженный в тоннах на гектар в год. Используется универсальное уравнение:

$$\text{Эп} = E \times \text{П} \times \text{Р}, \quad (2)$$

где Эп – потенциальный смыв от дождевых (Э=Эд) или талых (Э=Эт) вод;
E – эрозионный индекс осадков, (E=Eд – для дождей, E=Eт – для талых вод);
П – эродируемость почв, т/га на единицу эрозионного индекса осадков;
Р – эрозионный потенциал рельефа.

Так как данное уравнение свободно от частных, географических и климатических ограничений, оно считается всеобщим универсальным (Голубев, 2009).

1.4. Методы оценки эрозионных процессов по рельефным данным

Сегодня использование данных дистанционного зондирования стремительно развивается во многих странах мира. Современное решение многих экономических проблем уже невозможно представить без использования материалов без воздушного и космического зондирования. Данные дистанционного зондирования используются при создании и обновлении почвенных карт, при осуществлении мелиоративных и агротехнических мероприятий, при проведении внутрихозяйственных работ, направленных на снижение и предотвращение деградации земель (Хорошилова, 2013).

На сегодняшний день было придумано большое количество методов оценки эрозионных процессов по рельефным данным и данным дистанционного зондирования (ДДЗ), которые приведены во многих научных статьях.

С.Ю. Булыган с соавторами (2012) предложили интегральный анализ данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа (ЦМР). В современном почвоведении количественный анализ ЦМР активно используется для установления корреляционных зависимостей между отдельными почвенными параметрами и характеристиками рельефа (Евдокимова, 1987), оценки изменения структуры почвенного покрова (Общесоюзная инструкция..., 1964), построения почвенных карт (Сорокина, Козлов, 2009). Предложенный исследователями подход к составлению прогнозных почвенных карт на основе количественного интегрального анализа разноплановых материалов применим в первую очередь к зональным почвам, формирующимся на хорошо дренируемых водоразделах, имеющих наибольшее распространение на территории лесостепной и степной зон. Схема исследований предусматривает построение прогнозной почвенной карты полигона на основании интегрального анализа ЦМР и ДДЗ с привлечением архивной карты почв. Главным достоинством предложенной методики предстаёт предметностью выбора контуров почвы, основанной на использовании логико-статистических моделей и методов геоинформационного анализа, а также однообразии процедуры получения прогнозных карт почв, что позволяет обеспечить повторяемость результатов картографирования (Булыган и соавт., 2012).

Влияние на эрозионные процессы почв оказывают такие основные факторы, как характер осадков, устойчивость почвенного покрова к смыву, особенности рельефа местности и состояние надпочвенного покрова. А.Н. Мунтян (2016) в своем исследовании для расчёта внутригодового распределения эрозионной опасности климата использовал плювиометрический коэффициент (Сластихин, 1964), потенциальный смыв почвы рассчитан по методу RUSLE (Foster et al., 1997), также рассчитан показатель потенциальной длительности расходования почвы при постоянной среднемноголетней величине смыва (Лисецкий, 1991). Изученные показатели эрозионной опасности и потенциального почвопотребления исследуемой

территории указывают на необходимые комплексы для проведения агротехнических, лесомелиоративных и других мероприятий, направленных на минимизацию эрозионных процессов (Мунтян, 2016).

Л.Н. Трофимец и Е.А Паниди (2016) основным предметом для исследования использовали естественный радионуклид ^{40}K . В качестве вспомогательных компонентов использовались материалы топографической съемки. Пробы подвергались радиологическому и, частично, агрохимическому анализу. В качестве картографических основ использовались мультиспектральные спутниковые снимки и топографические карты, с которыми сравнивались точки отбора. На основе карт и снимков рассчитывалась кривизна профиля по общепринятой за рубежом методике (Evans, 1972; Krcho, 1973). Использование спутниковых снимков сверхвысокого разрешения, полученных в весенний период, когда на них хорошо расшифровывается положение потоков, позволяет распознать тальвеги этих потоков. Данные о содержании гумуса позволяют обнаружить "носителя" повышенной радиоактивности в почве по ^{40}K . Тем самым, утверждение, что карта профильной кривизны позволяет по ^{40}K количественно оценивать радиоактивность почвы, правдиво. Но, следует отметить, что для выяснения истинной причины вариабельности радиоактивности почвы по ^{40}K можно, но для этого следует дополнить анализ данными агрохимических измерений (Трофимец, Паниди, 2016).

А.В. Кошелев (2018) строил цифровую модель рельефа на основе высотных данных SRTM, версия 3, с размером ячейки 3x3 угловых секунды и пространственным разрешением 90 м. Основываясь на установленных закономерностях географического распространения почв по элементам рельефа проводилась последовательная генерализация почв водоразделов в один выдел, почв склонов – в другой, а понижений – в третий (Козлов и Сорокина, 2012). Произведя сочетание ЦМР и оцифрованной карты почвенных контуров, дешифрирования космических снимков были отредактированы контуры почв, расположенных в овражно-балочной системе,

контуры черноземов южных, а также контуры по степени смытости (Кошелев, 2018).

К.А. Мальцев с соавторами (2018) построили ЦМР на основе топографической карты с использованием программного продукта ArcGIS, где был реализован метод М. Хатчинсона. Для построения ЦМР выбрали шаг постоянной растровой сетки равным 5 м. Средние ошибки в расположении объектов и контуров рельефа на карте (плане) составляют 0,5 мм. Для этого были рассчитаны три количественных показателя, используемых для нахождения коэффициента рельефа: уклон, длина склона и площадь входного участка (S_{se}) (Мальцев и др., 2018).

Для расчета уклонов была использована формула (Burrough et al., 2015):

$$S = \frac{180}{\pi} \arctg \left(\sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \right), \quad (3)$$

∂_x , ∂_z , ∂_y – частные производные вдоль координатных осей.

Длина склонов была оценена на основе такого показателя, как длина линий тока. С использованием геоинформационных технологий длина линий тока может быть рассчитана различными методами (Vigiak et al., 2015). В данном исследовании, для трёх моделей были вычислены показателя S_{se} , выполнен их статистический анализ и построены гистограммы частот для следующих интервалов площади: 0-100; 100-250; 250-1000; 1000-10000; 10000-100000; более 100000 м². Расчёт смыва проводился для условий чистого пара, обработка которой начинается летом или осенью. Использовался основной статистический анализ, а также гистограммы распределения площади пахотных земель по площади водосбора на основе карт смыва с различными бонитеровочными показателями смыва для сопоставления их с полученными результатами (Мальцев и др., 2018).

Для построения цифровой модели рельефа используется модель ASTER GDEM v.2 (Минеев и др., 2015). Для создания точной ЦМР на основе ASTER GDEM выполнили следующие действия: 1) извлекли и объединили данные; 2) заменили неправильные значения отметок высот и «пустот» с использованием

метода статистического анализа абсолютного медианного отклонения и данных GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки; 3) устранили шероховатости, шумы и ошибки, возникающие при объединении и наложении снимков (модуль DTM Filter и модуль Simple Filter); 4) заполнили впадины по выбранному методу L. Wang и H. Liu (2006).

1.5. Методы оценки эрозионных процессов по данным дистанционного зондирования

Специалистами Японского Международного исследовательского центра сельскохозяйственных наук была проведена исследовательская работа по выявлению эрозионных процессов с помощью спутниковых данных двух платформ – Landsat и ALOS (Uchida, 2015). Была представлена методика, основанная на характеристиках того, что каждое землепользование показывало определенное временное изменение характеристик почвенного покрова, и его можно было оценить по максимальному значению показателей, отражающих состояние поверхности. В работе использованы 5 индексов: NDBSI (нормализованного разностного индекса голой почвы) и NDSI (нормализованного разностного индекса почвы) было представлено состояние поверхности почвы, индекса NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) был для растительности и LSWI (индекс поверхностных вод суши) и NDWI (нормализованный разностный водный индекс) были для воды. Следующим этапом было вычисление топографического фактора в уравнении USLE, представленного значением LS. Последнее предложено группой геоинформационных наук и моделирования окружающей среды Университета штата Северная Каролина.

$$LS=(m + 1) \times \left(\frac{FlowAccumulation \times resolution}{22,1} \right)^m \times \left(\frac{\sin \theta}{0,09} \right)^n, \quad (4)$$

где m и n-постоянные параметры, обычно заданные в диапазоне от 0,4 до 0,6 и от 1,0 до 1,4 соответственно. Накопление потока обеспечивалось процессом

пространственного анализа ArcGIS, разрешение составляло 2,5 метра, а угол наклона θ вычислялся по цифровым данным высот (Mitasova, 2000).

Потенциал потерь почвы в Китае оценивался путем интеграции спутниковых снимков, полевых образцов и наземных наблюдений на основе пересмотренного универсального уравнения потерь почвы (RUSLE) (Hong-fen et al., 2019). Коэффициент эрозии осадков оценивался на основе комбинированных данных об осадках с использованием коллективного Кокригинга (ColCOK) и уменьшенной шкалы с использованием географически взвешенной регрессии (GWR). Регрессионный подход «случайный лес» (RF) использовался в качестве инструмента для понимания и прогнозирования взаимосвязи между фактором эродированности почвы и набором факторов окружающей среды. Точность его модели была показана с использованием R^2 (коэффициента детерминации) и RMSE (среднеквадратичной ошибки) прогнозов.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_m - R_t)^2}, \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{\sum (R_m - R_m)(R_t - R_t)}{\sqrt{\sum (R_m - R_m)^2 \sum (R_t - R_t)^2}}. \quad (6)$$

Несмотря на то, что во всем мире предпринимаются усилия по борьбе с эрозией почв посредством целевых проектов в области SWC и изменений в землепользовании в различных пространственных масштабах (Gisladottir, Stocking, 2005; Ziadat, Taimeh, 2013), существующие методы оценки эрозии почв не обеспечивают достаточной точности на региональном уровне. В последние несколько десятилетий было разработано множество основанных на физике концептуальных и эмпирических моделей для прогнозирования эрозии почв (Vente, Poesen, 2005). Однако большинство из них требуют больших объемов входных данных, которые должны быть получены в ходе экспериментов и полевых исследований.

Лю с соавторами (Liu et al., 2002) разработал уравнение потери почвы (CSLE). Коэффициент крутизны склона рассчитывается с помощью уравнения (Liu et al., 1994) при градиенте наклона $>10^\circ$. Кроме того, CSLE реклассифицирует факторы управления покровом (C) и практики поддержки (P) в растительный покров и биологическую практику (B), а также инженерные методы (E) и методы обработки почвы (T). В исследовании использовали CSLE, который основан на RUSLE и доказал свою применимость к землепользованию, типам культур, методам обработки почвы и климатическим условиям для расчета модуля эрозии и исследования интенсивности эрозии (Duana et al., 2019); CSLE дается следующим образом (Liu et al., 2002, 2013):

$$A = R \times K \times L \times S \times B \times E \times T, \quad (7)$$

где A – прогнозируемая потеря почвы на единицу площади ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$), R – фактор дождевой эрозии, представляющий собой потенциальную эрозионную способность дождя, K – коэффициент эродуемости почвы ($t \cdot ha \cdot h / hm^2 \cdot MJ \cdot mm$), L – коэффициент длины склона (т. е. отношение потерь почвы с экспериментального поля с конкретной длиной), S – коэффициент градиента склона (т. е. отношение потерь почвы от градиента поля к потере почвы от уклона 9%), B – фактор растительного покрова и биологической практики (т. е., отношение потерь почвы с опытного поля с заданным типом растительности и покровом или биологической практикой предотвращения эрозии почвы к потере почвы с поля в условиях залежи), E – коэффициент SWC (т. е. отношение потерь почвы с опытного поля с заданными мерами по сохранению к потере почвы с поля с прямолинейным земледелием и уклоном вверх и вниз), и T – коэффициент обработки почвы и управления.

Все растровые данные R , K , L , S , B , E и T были наложены в ArcGIS 10.3 (ESRI, Redland, CA, USA, 2015), и модуль эрозии почвы был рассчитан с помощью примера (7) (Duana et al., 2019).

В исследовании эфиопских ученых использовалась пересмотренная модель универсального уравнения потерь почвы (RUSLE) (Renard et al., 1997)

для оценки потерь почвы и составления карты ее пространственной изменчивости. Эта модель была выбрана потому, что она требует минимальных данных и имеет низкую вычислительную стоимость, что делает ее более подходящей для регионов с дефицитом данных и денежных ресурсов (Garg, Jothiprakash, 2012; Шовдарь и др., 2013). RUSLE определяется как (Renard et al., 1997 г.):

$$\text{RUSLE (t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}) = R \times K \times LS \times C \times P, \quad (8)$$

где R = эрозионность осадков (МДЖ мм га⁻¹ ч⁻¹ год⁻¹); K = эродлируемость почвы (т га ч га⁻¹ МДЖ⁻¹ мм⁻¹); LS = длина склона-крутизна (-); C = землепользование/покров (-); и P = факторы сохранения/управления (-).

Для получения коэффициента LS была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) радиолокационной станции Shuttle Topography Mission (SRTM) с разрешением 30 м. ЦМР был предварительно обработан для заполнения ложных впадин с целью направления стока и связанного с ним осадка к водосборному выходу. Для эфиопского условия использовали эмпирическое уравнение, установленное Хурни (1985), чтобы получить R фактор из данных о среднегодовых осадках:

$$R = 0.36 \times \text{MAP} + 47.6, \quad (9)$$

где R – коэффициент эрозии осадков (МДЖ мм га⁻¹ ч⁻¹ год⁻¹), а MAP – среднегодовое количество осадков (мм).

Для учета осаждения использовали коэффициент доставки отложений (SDR), долю эродированной почвы из определенной области, которая успешно достигает водного канала (Walling, 1983; Stefano et al., 2005). Согласно статье Стефано и др. (2005). SDR можно рассчитать, как:

$$\text{SDR}_i = \exp\left(-\beta \times \frac{L_i}{R_i S_i^{1/2}}\right), \quad (10)$$

где, β – коэффициент маршрутизации; L_i – длина сегмента i в пути потока и равна длине стороны или диагонали ячейки в зависимости от направления потока в ячейке; R_i – коэффициент, основанный на характеристиках шероховатости поверхности; и S_i – градиент наклона (m m^{-1}). В

вышеизложенном исследовании использовали модель с графическим интерфейсом, разработанную с использованием RUSLE, скорректированного на SDR, для оценки истинных потерь почвы и оценки воздействия различных методов SWC (Tamene et al., 2014).

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

2.1. Объект исследования

Территорией исследования является Пестречинский муниципальный район, расположенный в Предкамье Республики Татарстан, а именно участки с открытым почвенным покровом (рис. 1). Поверхность имеет общий уклон с севера на юг. Водоразделы лежат на высотах 140-200 м. В целом по району соотношение экспозиций склонов распределяется следующим образом: склоны «холодной» экспозиции занимают – 45%, а склоны южной – 33,7%.

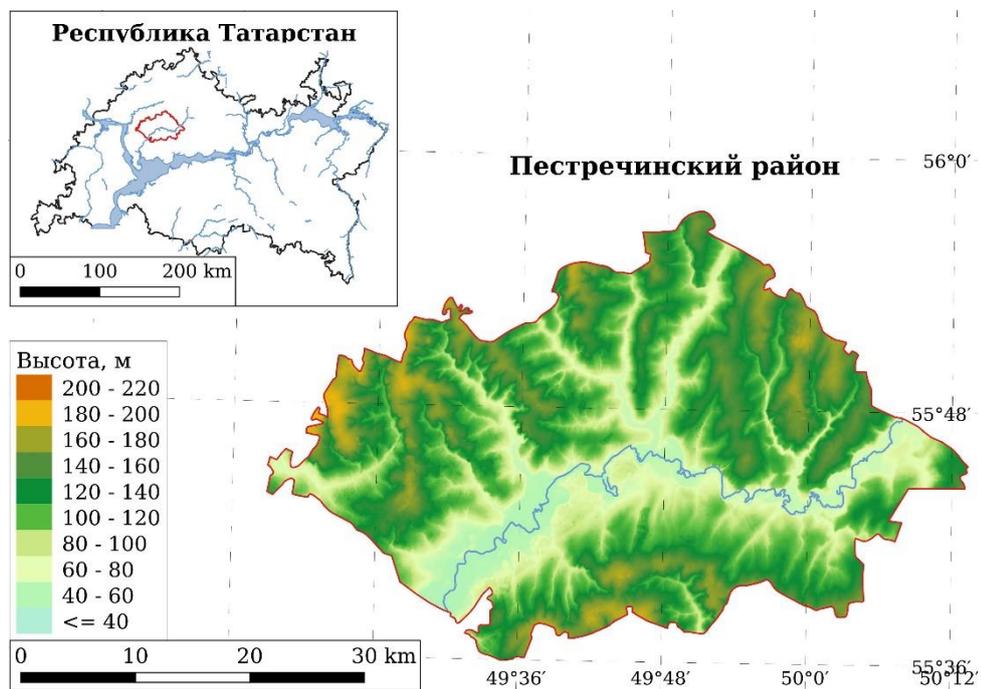


Рис.1. Карта высотных отметок Пестречинского района

Климат района характеризуется как умеренно-континентальный с холодной зимой, теплым летом и достаточным количеством осадков. Сумма годовая осадков составляет 500-540 мм. Сумма осадков за теплый период года составляет 320-360 мм (Ермолаев с соавт., 2007).

Почвенный покров района тесно связан с рельефом и литологией материнских пород и представлен нечерноземными почвами. Расположение района в южной части лесной зоны, характеризуется распространением лесных почв подзолистого типа – это среднеподзолистые и слабоподзолистые

почвы (светло-серые лесные (49,2%) и дерново-подзолистые (20,3%)), а также серые и темно-серые лесные (13,8%), дерново-карбонатные (2%).

Район Предкамья расположен в подзоне южной тайги. Данный ландшафтный район находится в Волжско-Камском равнинном регионе северных растительных фитоценозах, это широколиственные леса с елью и долинные сосново-широколиственные и сосновые травяные леса. Основными лесными формациями являются дубравы с липой и другими широколиственными породами (Почвы Татарии, 1962).

2.2. Данные дистанционного зондирования

Для проведения исследования воспользовались снимком, сделанным со спутника Landsat-8. Данный спутник был запущен 11 февраля 2013 г., данные, получаемые спутником, имеются в свободном доступе для всех пользователей. Ежедневно спутник снимает порядка 400 сцен (площадь около 12,5 млн. м²).

Таблица 2

Характеристики аппаратуры

Тип данных	Параметры
Режим съёмки	Моносъёмка
Спектральные каналы	Панхроматический; мультиспектральные: VNIR(6), SWIR(2), TIR(2)
Пространственное разрешение в надире, м	15 панхроматический; 30 (VNIR, SWIR), 100 (TIR)
Динамический диапазон бит/пиксель	16
Ширина полосы съёмки в надире, км	185
Период повторной съёмки	1 раз в 16 суток
Производительность съёмки	До 12,5 млн

Для исследования использовался снимок 2019 г., взятый с сайта earthExplorer.usgs.gov. Снимок получен 7 июня 2019 года, его путь составляет 170 и ряд 21.

2.3. Методы исследования

Для анализа влияния эрозионных процессов на спектральные отражательные свойства почвенного покрова на региональном масштабе необходимо получить карту района исследования с выделенными участками открытой почвы без какой-либо растительности и других помех. Для создания карты земного покрова Пестречинского района был отобран мультиспектральный спутниковый снимок Landsat-8. Пространственное разрешение которого составляет 30*30 м. Предварительная обработка снимка для последующего использования включает: (1) конвертацию цифровых значений яркости (Digital Numbers) в значения отражения на поверхности атмосферы (Top Of Atmosphere Reflectance), (2) атмосферная коррекция по методу DOS1 (Chavez, 1996; Landsat..., 2015).

Картографирование типов земного покрова проводилось путем контролируемой классификации спектральных слоев снимка Landsat-8: B2 (0.45-0.51 мкм), B3 (0.53-0.59 мкм), B4 (0.64-0.65 мкм), B5 (0.85-0.88 мкм), B6 (1.57-1.65 мкм), B7 (2.11-2.29 мкм). Дополнительно, помимо самих слоев снимка Landsat-8, на их основе рассчитаны спектральные индексы, поскольку использование только спектральных слоев снимка не позволяет провести однозначную классификацию поверхностей со схожими спектральными сигнатурами (Рязанов и др., 2015). Спектральные индексы находят широкое применение для повышения точности машинного определения типов земной поверхности (Varati et al., 2011). Трансформация и комбинирование спектральных слоев позволяет выделить те или иные особенности земного покрова. В работе для повышения точности классификации типов земного покрова использовано 27 индексов, представленных в таблице 3.

Классификация типов земного покрова проведена с использованием метода RandomForest, основанным на использовании ансамбля независимых деревьев классификации и регрессии. Данный метод хорошо подходит для моделирования с использованием большого количества коррелированных предикторов (James et al., 2013).

Перечень использованных спектральных индексов

Индекс	Полное название	Источник
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Rouse et al., 1973
EVI	Enhanced Vegetation Index	Huete et al., 2002
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	Huete, 1988
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	Qi et al., 1994
NDMI	Normalized Difference Moisture Index	Deng et al., 2015
NBR	Normalized Burn Ratio	Key, Benson, 2005
NBR2	Normalized Burn Ratio 2	Key, Benson, 2005
CMR	Clay Minerals Ratio	Drury, 1987
FMR	Ferrous Minerals Ratio	Drury, 1987
IOR	Iron Oxide Ratio	Drury, 1987
GLI	Green Leaf Index	Louhaichi et al., 2001
GOSAVI	Green Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	Sripada et al., 2005
GRVI	Green Ratio Vegetation Index	Sripada et al., 2006
LAI	Leaf Area Index	Boegh et al., 2002
MNLI	Modified Non-Linear Index	Yang et al., 2008
NDSI	Normalized Difference Soil Index	Deng et al., 2015
Brightness	Tasseled Cap Brightness	Kauth, Thomas, 1976
Greenness	Tasseled Cap Greenness	Kauth, Thomas, 1976
Wetness	Tasseled Cap Wetness	Kauth, Thomas, 1976
BCI	Biophysical composition index	Deng et al., 2015
RNDSI	Ratio Normalized difference soil index	Deng et al., 2015
PCA (1-6 комп-ты)	Principal Component Analysis	-

Для обучения модели классификации в пределах границ исследуемой территории случайным образом создан тренировочный набор из 1204 точек. Каждая из тренировочных точек экспертным методом вручную классифицировалась как один из 5 классов земного покрова: (1) открытая почва, (2) почва с разреженной растительностью, (3) растительный покров, (4) водная поверхность, (5) урбанизованная территория (рис. 2).

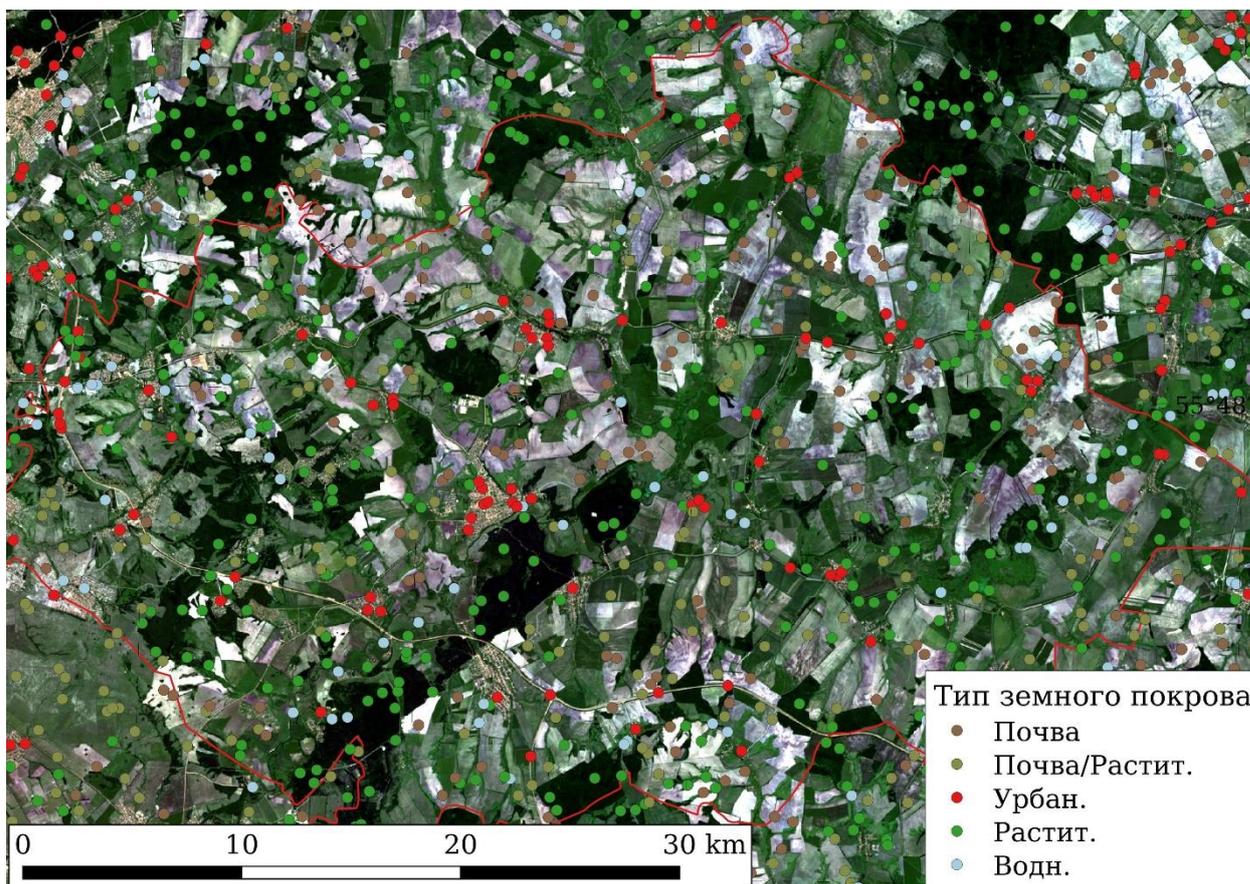


Рис. 2. Расположение тренировочных точек

Следующим этапом нормализации геоданных является уменьшение влияния на снимок атмосферы и перевод значений радиации, дошедшей до сенсоров спутника, в значения действительно отражённого от земли солнечного света.

Влияние атмосферы на космическое изображение проявляется в ряде факторов: угол падения и отражения солнечного света, прозрачность атмосферы, газовый фактор и дымка. Для дальнейших исследований необходимо провести оптическую коррекцию (нормализацию) данных геоизображения с использованием метода вычитания темных объектов (DOS), впервые представленного P.S. Chavez (1996).

Существует два основных способа поиска 1%-темного объекта (Dark Object) для метода DOS:

1. Эмпирический метод воплощается ручным способом нахождения значений, например, с использованием инструмента «гистограммы» в QGIS;

2. Вычислительный метод основывается на том, что общая яркость (от 0 до n) однопроцентного темного объекта будет соответствовать 0,01% от общей яркости всех пикселей в геоизображении (Sobrino et al., 2004).

По второму методу рассчитывается значение радиации, соответствующей значению яркости 1%-темного объекта:

$$L\lambda_{min} = DN_{min} \times Gain\lambda + Bais\lambda \quad (12)$$

где: $L\lambda_{min}$ - спектральная радиация для 1% тёмного объекта; DN_{min} - значения яркости пикселя 1% тёмного объекта; $Gain\lambda$ - усиление значения радиации относительно яркости 1% тёмного объекта; $Bais\lambda$ - смещение значения радиации относительно яркости 1% тёмного объекта.

Предварительная обработка снимков Landsat и финальная компоновка карт проводились с использованием геоинформационной системы QGIS (QGIS..., 2018) и модуля Semi-Automatic classification Plugin (Congedo, 2013). Для классификации земного покрова использована реализация метода RandomForest в пакете «randomForest» для статистической среды R (Liaw, Wiener, 2002; R Core Team, 2018).

Для расчёта LS-фактора используется программное обеспечение SAGA GIS, гидрологический модуль. P. Panagos, P. Borrelli, K. Meusburger (2015) предложили рассчитывать S-фактор по формуле:

$$S = 10.8 \times \sin \Theta + 0.03, \text{ где уклон } < 0.09, \quad (13)$$

$$S = 16.8 \times \sin \Theta - 0.5, \text{ где уклон } \geq 0.09, \quad (14)$$

где Θ - наклон в градусах.

P. Desmet и P. Govers (1996) в свою очередь для определения L-фактора – длины склона, предложили использовать двумерную территорию местности:

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - A_{i,j-in}^{m+1}}{D^{m+2} * \chi_{i,j}^m * 22,13^m}, \quad (15)$$

где $A_{i,j-in}$ – содействующая область (i,j), измеряется в м²; D – размер ячейки, м; $\chi_{i,j} = \sin a_{i,j} + \cos a_{i,j}$, $a_{i,j}$ является выраженным направлением ячейки сетки; m – связано с отношением β :

$$m = \frac{\beta}{\beta+1}, \quad (16)$$

где,

$$\beta = \frac{\frac{\sin\theta}{0,0896}}{[0,56+3*(\sin\theta)^{0,8}]}, \quad (17)$$

где θ – угол наклона в градусах. M колеблется между 0 и 1 и приближается к 0, когда отношение без эрозионной поверхности к эрозии близко к 0.

2.4. Влияние топографического фактора эрозионности на светлоту почвенного покрова

Для оценки наличия и интенсивности протекания эрозионных процессов почвенного покрова на региональном масштабе был проведен анализ зависимости светлоты поверхности открытых участков почвы от мультимасштабного индекса плоскостности дна долин – MRVBF (табл. 3).

MRVBF – топографический индекс, разработанный для определения зон отложения материала на диапазоне масштабов. Основан на наблюдении, что дно долин является более плоским и низким, чем их окружение, а более большие долины также и более низкие, и плоские в сравнении с меньшими долинами. Нулевые значения обозначают эрозионные элементы рельефа, значения >1 обозначают большие зоны осадения.

В качестве показателя смывости почвенного покрова использован компонент светлоты (Brightness) полученный при помощи метода трансформации мультиспектральных снимков Tasseled Cap (табл. 3). Преобразование Tasseled Cap является частным случаем анализа главного компонента, который преобразует данные мультиспектрального снимка в новую систему координат с новым набором ортогональных осей. Светлота – представляет главную ось и вычисляется как взвешенная сумма отражений всех спектральных каналов (Kauth, Thomas, 1976).

При этом очевидно, что светлота почвенного покрова зависит не только от степени смыва верхнего гумусового горизонта, но также может варьировать в зависимости от содержания гумуса, соединений железа и марганца,

изменяться в зависимости от гранулометрического состава и наличия подстилающих пород. Более того, вариабельность цвета и светлоты почвенного покрова на региональном масштабе тесно связана с генетическим разнообразием почвенного покрова, а также разной влажностью почв, находящихся на значительном расстоянии друг от друга.

Для устранения влияния описанных выше факторов, анализ зависимости светлоты почвенного покрова от топографических параметров почвенной эрозии был проведен с помощью локальных метрик, рассчитанных для движущегося окна. Рассчитывалась локальная корреляция значений с использованием критерия Пирсона. Расчёт проводился в соответствии со следующим алгоритмом:

- вокруг каждой ячейки растра определялась локальная область размером 13×13 ячеек, что соответствует размеру области 390×390 м;
- рассчитывается коэффициент корреляции и уровень значимости между параметрами светлоты индекса MRVBF с использованием $13 \times 13 = 169$ ячеек;
- рассчитанные значения присваиваются центральной ячейки;
- операции выше повторяются для каждой ячейки всего растра.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Классификация типов земного покрова

Распределение случайно созданных точек для тренировки модели классификации типов земного покрова неравномерно (рис. 3). На территории Пестречинского района Республики Татарстан наибольшее количество тренировочных точек классифицировано как растительный покров; сюда входят как плотная травянистая растительность, так и древесная хвойная и лиственная растительность. Меньшее количество точек классифицировано как водная поверхность.

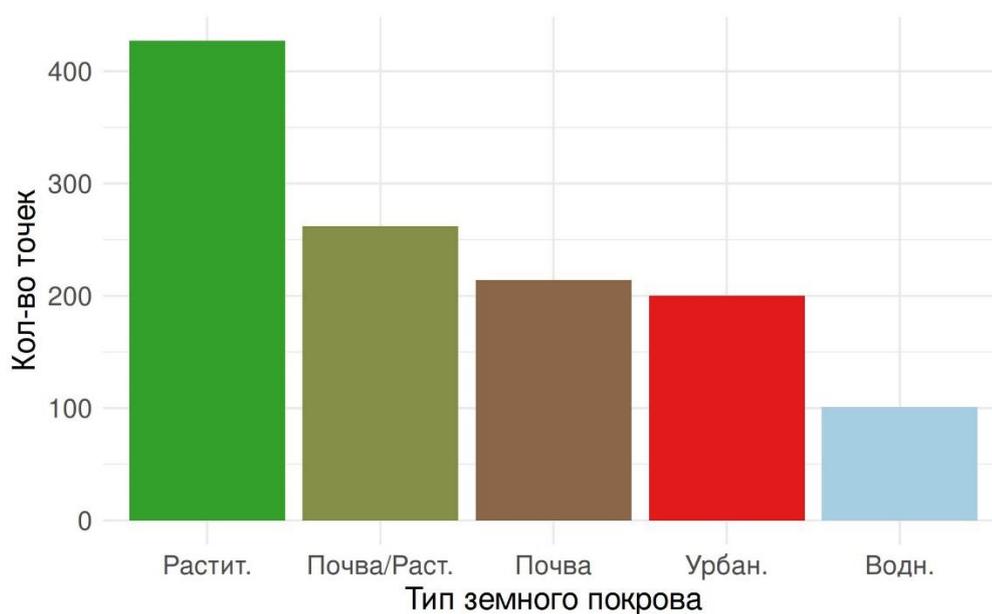


Рис. 3. Количество точек по типам земного покрова

На рисунке 4 представлены спектральные сигнатуры тренировочных точек. Спектральные кривые урбанизированных территорий и открытых участков полей имеют практически одинаковую спектральную отражательную способность, так как во всех спектральных диапазонах идут параллельно друг другу, пересекаясь в спектрах В2 и В5 (рис. 4). Спектральная кривая почвы продолжает возрастать до диапазона 1,56-1,66 мкм, после постепенно теряя отражательную способность. Кривая водных объектов указывает на их низкую отражательную способность, поэтому расположена вдоль оси длины волны. Спектральная кривая растительности имеет высокую

отражательную способность в диапазоне 0,845-0,885 мкм, затем отражательная способность плавно снижается.

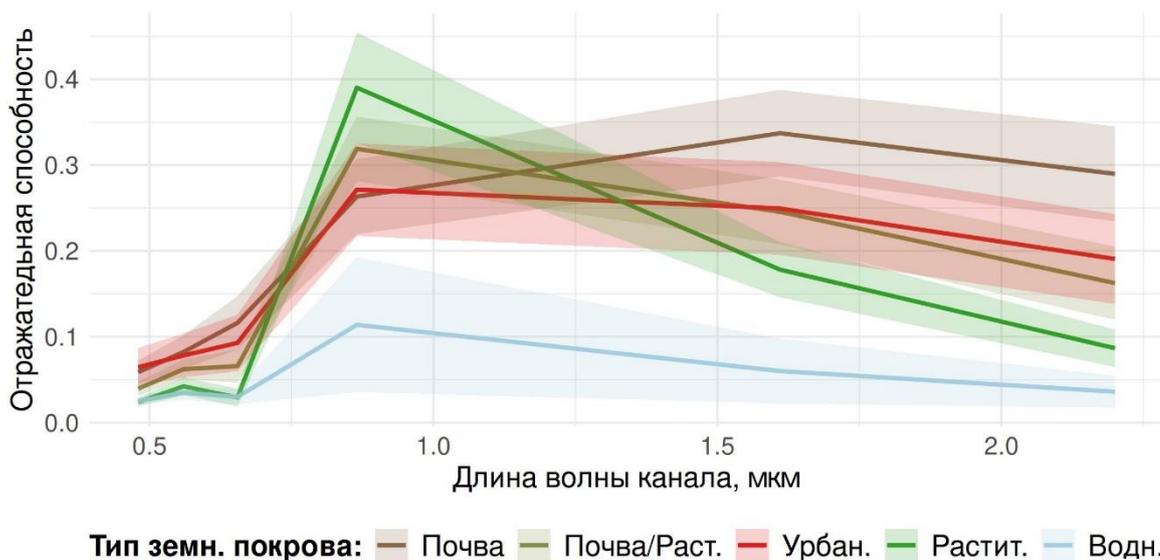


Рис. 4. Спектральные кривые типов земной поверхности

Результатом применения алгоритма RandomForest для классификации типов земного покрова с использованием спектральных слоев снимка Landsat-8 и рассчитанных спектральных индексов в качестве предикторов стала карта земного покрова Пестречинского района (рис. 5).

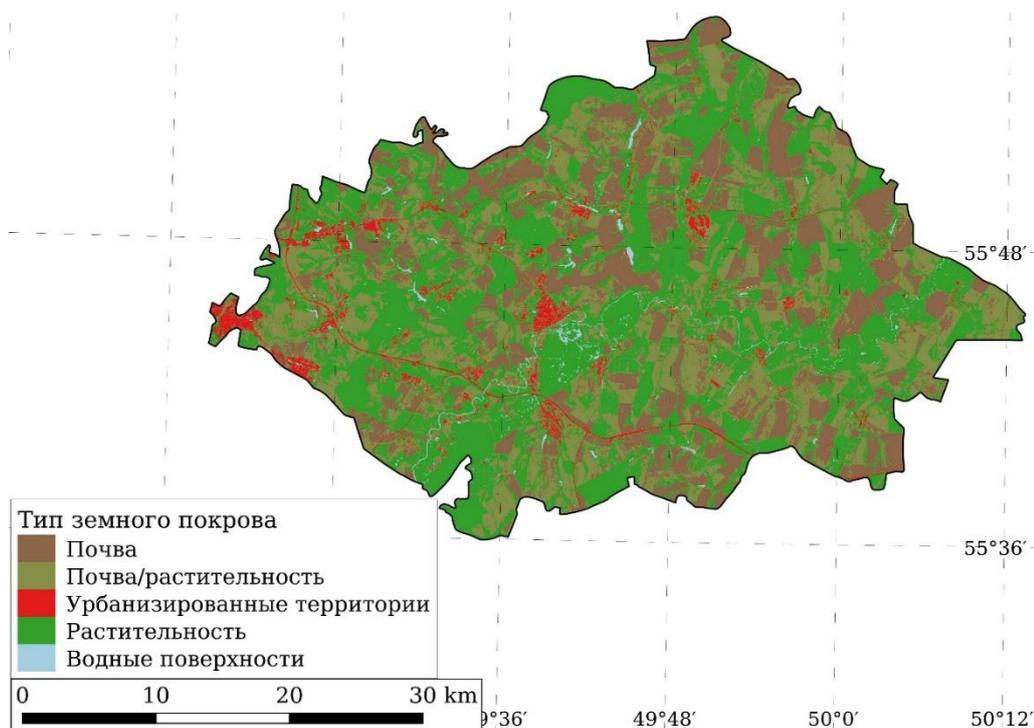


Рис. 5. Карта типов земного покрова Пестречинского района РТ

Итоговая матрица ошибок модели классификации представлена в таблице 4.

Таблица 4

Матрица ошибок модели классификации

		Реальные классы					Пользовательская точность, %
		Почва	Почва/Раст.	Урбан.	Раст.	Водн.	
Классификатор	Почва	201	11	2	0	0	93.93
	Почва/Раст.	15	217	7	23	0	82.82
	Урбан.	15	16	168	1	0	84.00
	Раст.	0	25	0	400	2	93.68
	Водн.	0	0	1	3	97	96.04
Точность классификатора, %		87.01	80.67	94.38	93.68	97.98	

Общая точность модели классификации составляет 89,95%, коэффициент Cohen`s Карра равен 0,87, что говорит о высокой согласованности прогнозных и реальных классов типа земного покрова (Banko, 1998). Наименьшая точность классификации наблюдается для смешанного типа земного покрова почвы с разреженной растительностью. При этом для настоящего исследования прежде всего важна точность классификации почвенного покрова. Так, 87% тренировочных точек, определенных к данному типу земного покрова, имеют корректный прогноз. В свою очередь, пользовательская точность указывает, что 94% точек, классифицированных как открытая почва, в реальности относятся к данному классу, 11 точек в реальности определено как почва с разреженной растительностью, и 2 точки в реальности относятся к урбанизированным территориям.

Сводные данные по площадям земного покрова Пестречинского района показали в таблице 5.

Таблица 5

Сводная характеристика земного покрова Пестречинского района по состоянию на 07 июня 2019 г.

Тип земного покрова	Площадь, га	% от общей площади
Почва	29470	21.88
Почва/Раст.	42106	31.27
Урбан.	4846	3.60
Раст.	57010	42.33
Водн.	1235	0.92
Сумма	134667	100

По официальным данным, общая площадь земель в Пестречинском районе составляет 133,9 тыс. га, из них под сельскохозяйственными угодьями 103,1 тыс. га, под пашни отведено 79,1 тыс. га (Государственный ..., 2019).

Отталкиваясь от официальных данных, для статистики были рассчитаны процентные соотношения каждого типа земной поверхности к общей площади района.

3.2. Рельефные параметры почвенного покрова

Рельефные параметры Пестречинского района рассчитаны на основе карты высот SRTM (рис. 6б). Описательная статистика для рельефных параметров дана для участков, определенных при классификации земного покрова как «открытый почвенный покров» (рис. 6а). LS фактор, отображающий потенциальную эрозионную опасность, обусловленную строением рельефа, представлен на рисунке 6д.

Анализ рельефных параметров территории, занятой открытыми участками почвенного покрова, показывает, что 90.5% (26674 га) расположено на ровных элементах рельефа с уклонами до 3° (табл. 5, рис. 7б). Площадь земель на склонах с крутизной 3-6° составляет 9.1% (2682.4 га). Данные территории относятся к

категории земель, пригодных лишь для сплошного посева зернотравяных севооборотов. Площадь земель с уклонами $>6^\circ$ незначительна и составляет 0.38% (113 га) от всех земель с открытыми участками почвы по данным классификации земного покрова. Тем не менее, данные территории являются не пригодными для ведения сельскохозяйственной деятельности из-за высокого потенциала почвенной эрозии.

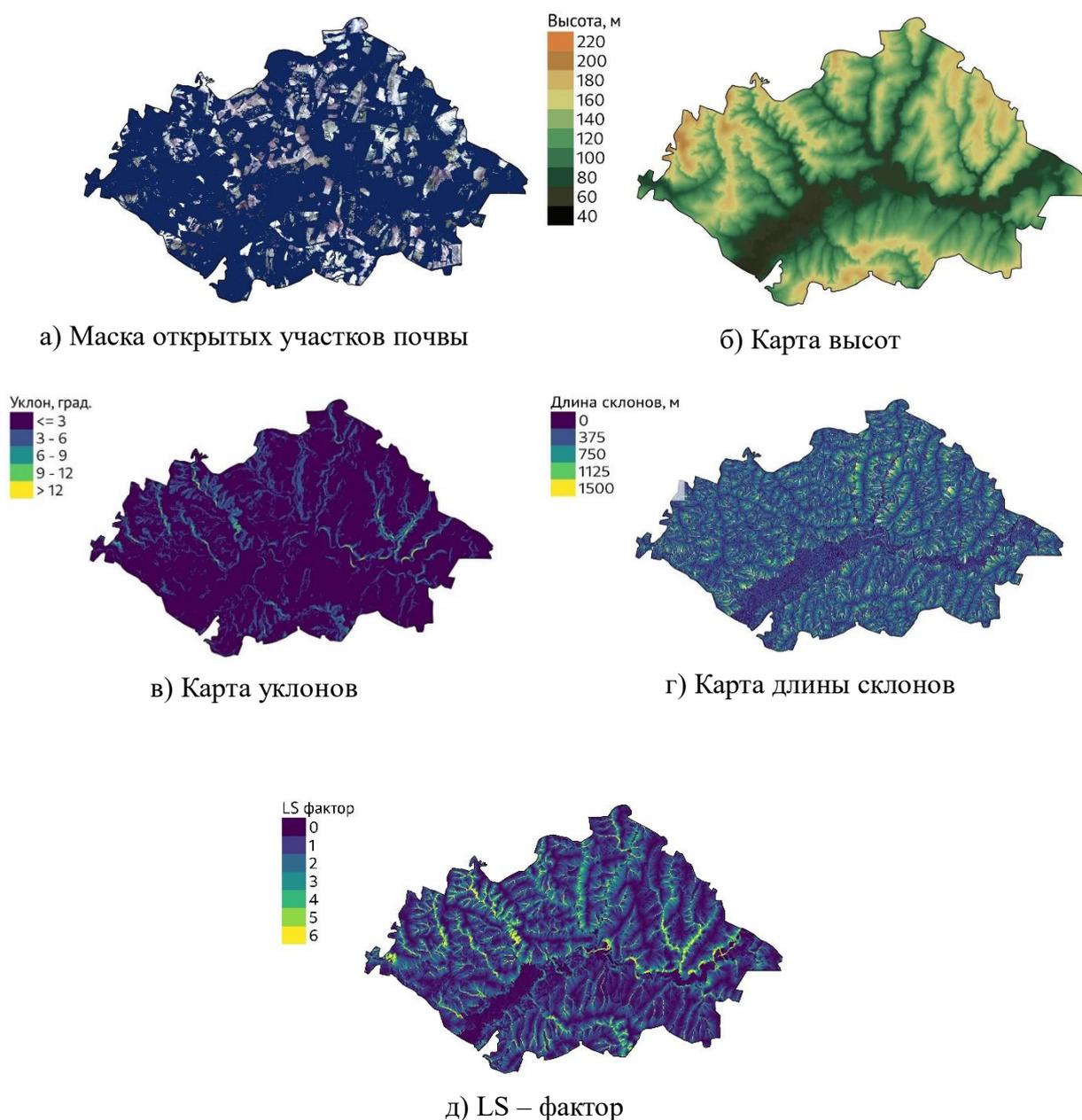


Рис. 6. Карты открытых участков почвы и рельефные параметры

По значениям LS фактора земли распределены следующим образом:

- 0-1 — 65.6% (19328.3 га) от площади земель с открытой почвой;

- 1-2 — 27.3% (8038.7 га);
- 2-3 — 5.4% (1583.3 га);
- 3-4 — 1.3% (369.9 га);
- 4-5 — 0.3% (85.1 га);
- 5-6 — 0.1% (34.7 га);
- >6 — 0.1% (29.9 га).

Таблица 6.

Описательная статистика параметров рельефа

Параметр	Min	Max	Mean	SD	CV
Высота, м	56.19	201.16	131.57	28.69	21.81
Уклон, град.	0.00	11.04	1.71	1.02	59.45
Уклон, %	0.00	19.51	2.99	1.78	59.55
Длина склонов, м	0.00	5618.01	248.83	271.85	109.25
LS фактор	0.00	21.45	0.91	0.73	80.54

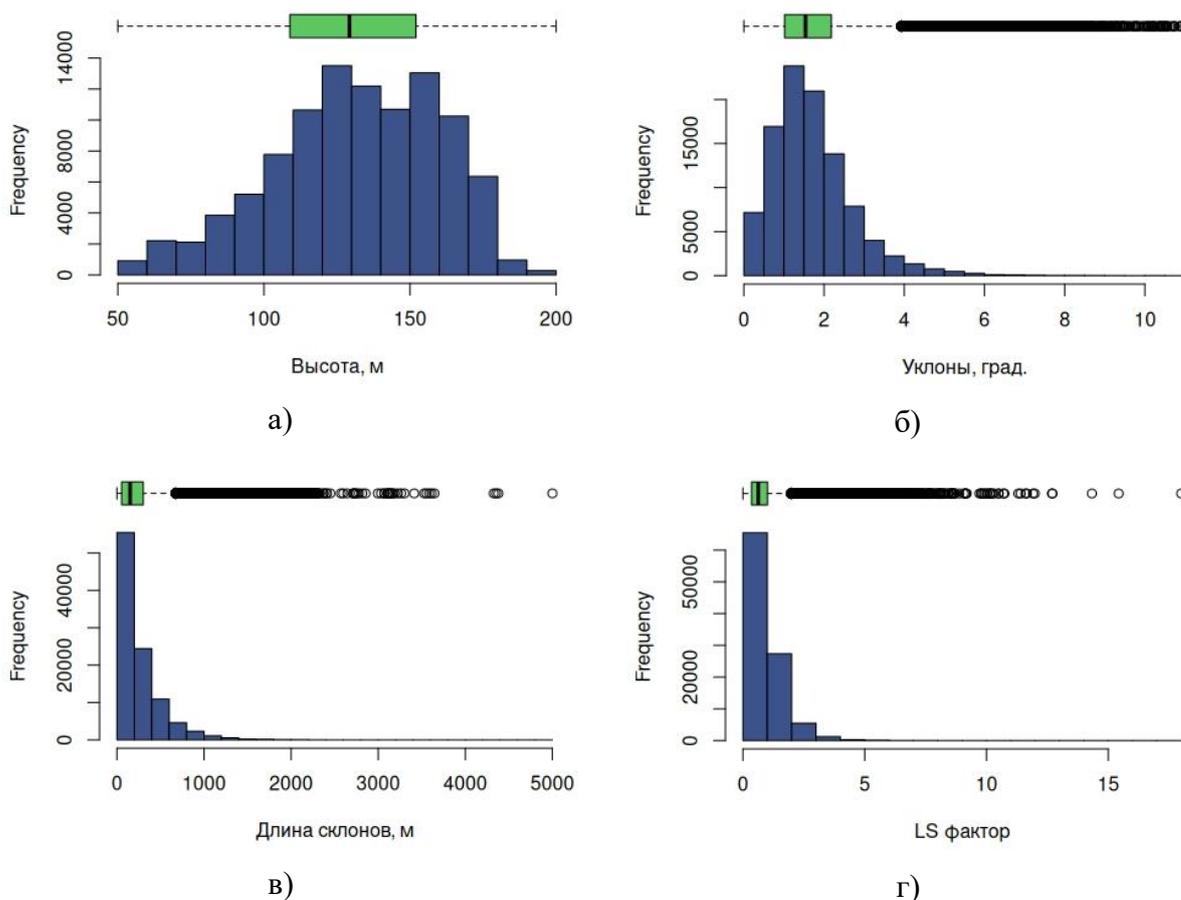


Рис. 7. Распределение значений рельефных параметров для участков с открытой почвой

3.3. Влияние топографических факторов

С помощью статистики в движущемся окне рассчитаны локальные значения коэффициентов корреляции между значениями светлоты почвенного покрова (рис. 8б) и мультимасштабным индексом плоскостности и дна долин (рис. 8а). Расчёт проводился для территорий, определенных в процессе классификации земного покрова земли как открытые участки почвы.

Результат представляет собой карту значений коэффициента корреляции, описывающих зависимость между двумя переменными в пределах локальной области размером 390×390 м (рис. 8в). Для большей части анализируемых территорий уровень значимости коэффициента корреляции ≤ 0.05 , что указывает на наличие статистически достоверной зависимости светлоты почвенного покрова от топографического фактора эрозии (рис. 8г).

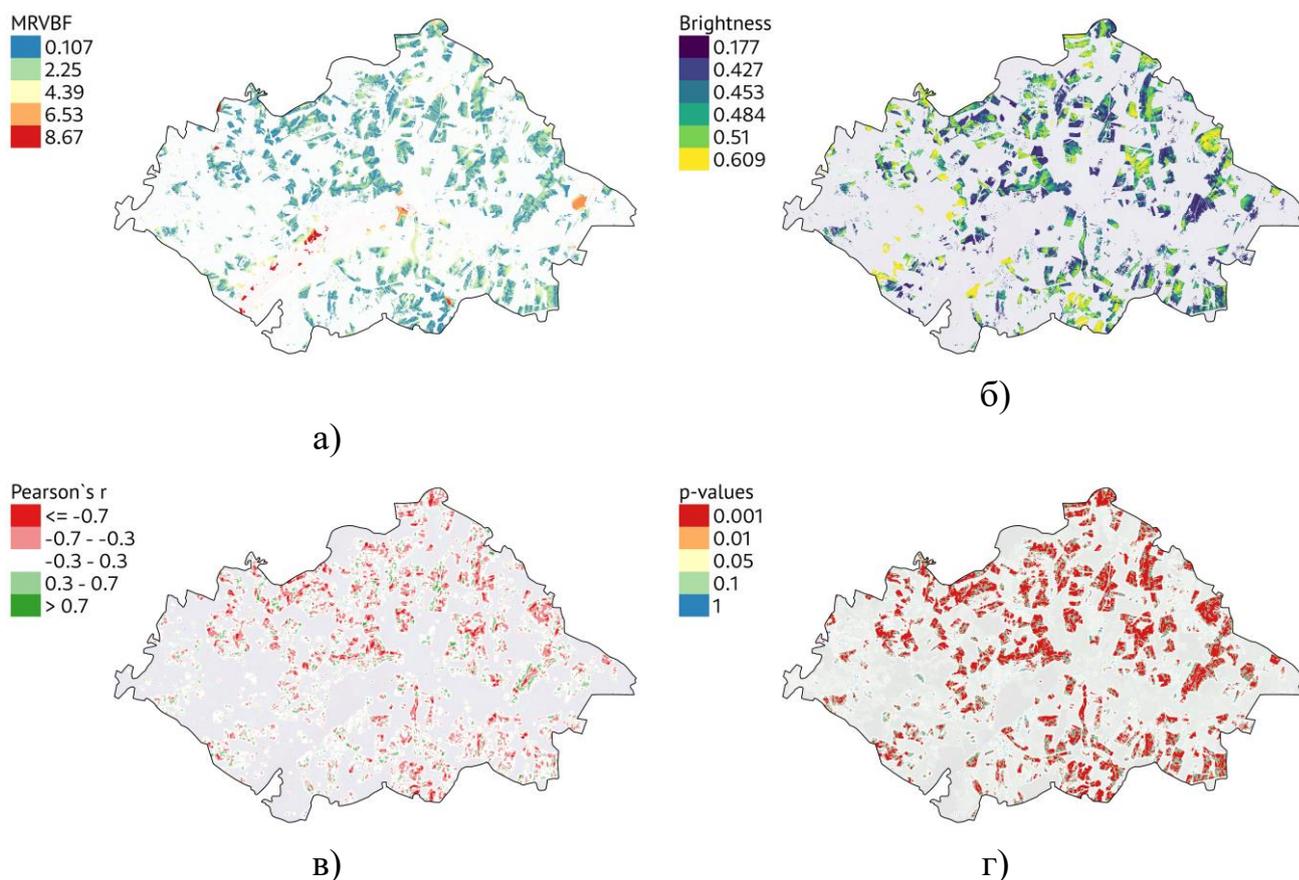


Рис. 8. Карты LS фактора, светлоты, коэффициентов корреляции и уровня значимостей для Пестречинского района РТ

На рисунке 9 показаны примеры полей на крупном масштабе для оценки зависимости параметра светлоты почвенного покрова и индекса MRVBF. На

рисунках показаны два поля с заметным осветлением поверхности почвенного покрова в верхней части склона.

Для обоих полей статистически значимая отрицательная корреляция между индексом MRVBF и значениями светлоты хорошо отражает процессы смыва верхнего слоя почвенного профиля, приводящее к осветлению почвенной поверхности. Высокие значения индекса MRVBF показывают более низкие и одновременно с этим плоские участки рельефа, при этом сильная отрицательная корреляция означает, что в этих элементах рельефа происходит уменьшение значений светлоты поверхности почвы, обусловленное переотложением смытого гумусового горизонта (рис. 9).

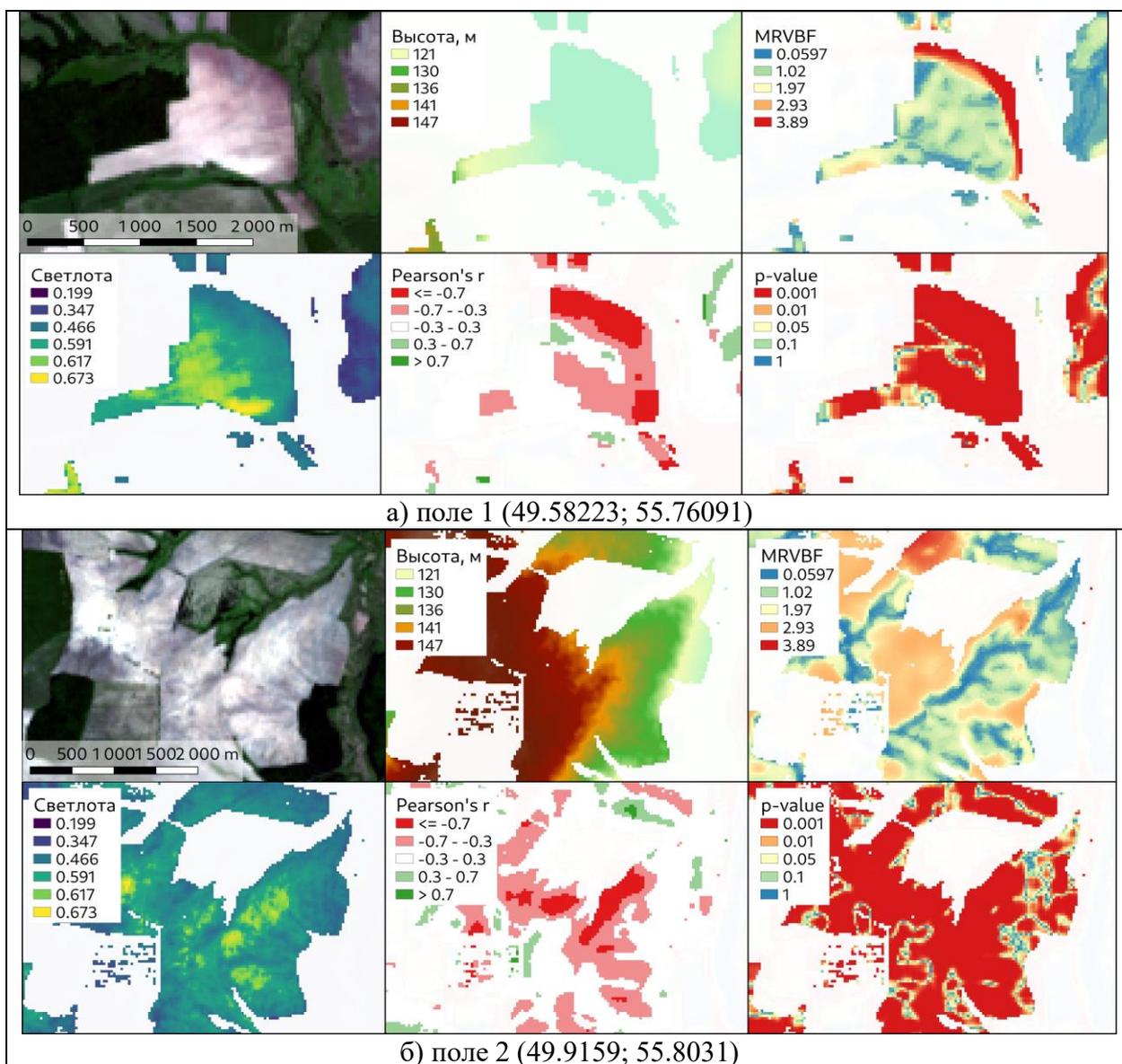


Рис. 9. Крупномасштабные примеры зависимости значений светлоты почвы и топографических параметров

Стоит отметить, что интерпретация положительных значений корреляции между параметрами светлоты и индекса MRVBF остается неопределенной, однако, вероятно, что данные области не стоит ассоциировать с интенсивной почвенной эрозией.

Результаты таблицы 7 показывают, что на площади в 8377 га происходит осветление поверхности почвенного покрова в результате смыва верхнего горизонта почв, из них для 833.22 га корреляция характеризуется как сильная.

Таблица 7. Корреляция параметров светлоты и индекса MRVBF

Pearson`s r	Площадь, га	% от общей площади
-1 — -0.7	833.22	2.83
-0.7 — -0.3	7544.79	25.62
-0.3 — 0	8821.17	29.96
0 — 0.3	7665.39	26.03
0.3 — 0.7	4265.19	14.48
0.7 — 1	312.48	1.06
Сумма	29442.24	100

Интерпретация положительных значений корреляции между параметрами светлоты и индекса MRVBF остается неопределенной. Наиболее вероятно, что данные области не стоит ассоциировать с интенсивной почвенной эрозией.

ВЫВОДЫ

1. С помощью классификации мультиспектральных данных дистанционного зондирования получена карта типов земного покрова Пестречинского района Республики Татарстан по состоянию на 7 июня 2019 г. На территории района земной покров представлен следующими типами: водная поверхность (0.92%), растительность (42.33%), урбанизированные территории (3.60%), почвенный покров с разреженной растительностью (31.27%), открытый почвенный покров (21.88%). Выделенные земли с открытым почвенным покровом составляют 37.2 % от общей площади пахотных угодий Пестречинского района.

2. Для земель, представленных открытым почвенным покровом, рассчитаны топографические параметры, определяющие развитие водной почвенной эрозии. Результаты показали, что 0.38% пахотных почв района расположены на участках с уклонами $>6^\circ$ и непригодны для ведения сельскохозяйственной деятельности. Около 2682 га расположено на склонах $3-6^\circ$ и пригодно для сплошного посева зернотравяных севооборотов. Рассчитан LS фактор длины и крутизны склонов для открытых участков почв: 0-1 – 19328.3 га; 1-2 – 8038.7 га; 2-3 – 1583.3 га; 3-4 – 369.9 га; 4-5 – 0.3% (85.1 га; 5-6 – 34.7 га; >6 – 29.9 га.

3. Проведена апробация метода анализа эрозионных процессов на региональном уровне с помощью оценки корреляции между параметрами светлоты поверхности почвы и индексом MRVBF. Результаты показали, что на площади в 8377 га происходит осветление поверхности почвенного покрова в результате смыва верхнего горизонта почв, из них для 833.22 га корреляция характеризуется как сильная. Апробированный метод нуждается в дальнейшей доработке ввиду плохой интерпретируемости положительных зависимостей. Результаты нуждаются в полевом подтверждении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аввакумова, А.О. Методика оценки пространственно-временной динамики эрозии почв по материалам повторных почвенных съемок в регионе интенсивного земледелия средствами ГИС-технологий / А.О. Аввакумова, О.П. Ермолаев // Вестн. Удм. ун-та. – 2011. – №4. – С. 3-7.
2. Булыган, С.Ю. Использование интегрального анализа данных дистанционного зондирования и цифровых моделей рельефа при картографировании почвенного покрова чернозёмной зоны / С.Ю. Булыган, А.Б. Ачасов, Ф.Н. Лисецкий // Журн. Научные ведомости Белгородского гос-го ун-та. Сер. Естеств. науки, 2012. – №21(140). – С/ 143-153.
3. Буряк, Ж.А. Совершенствование подходов к оценке эрозионной опасности агроландшафтов с использованием ГИС-технологий / Ж.А. Буряк // Научные ведомости. – 2014. – № 23. – С. 140-146.
4. Винокуров, М.А. Почвы Татарии / М.А. Винокуров, Б.В. Селивановский, А.В. Ступишин, Н.В. Колобов, М.В. Марков, А.В. Колоскова, А.Ш. Фаткуллин / Под ред. М.А. Винокурова. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1962. – 419 с.
5. Геннадиев, А.Н. Эрозия почв в различных условиях землепользования: оценка методом магнитного трассера / А.Н. Геннадиев, А.П. Жидкин, К.Р. Олсон, В.Л. Качинский // Почвоведение. – 2010. – №9. – С. 1126-1134.
6. Геннадиев, А.Н. Количественная оценка эрозионно-аккумулятивных явлений в почвах с помощью техногенной магнитной метки / А.Н. Геннадиев, К.Р. Олсон, С.С. Чернянский, Р.Л. Джонс // Почвоведение. – 2002. – № 1. – С. 21-32.
7. Геннадиев, А.Н. Сферические магнитные частицы как микрокомпоненты почв и трассеры массопереноса / А.Н. Геннадиев, С.С. Чернянский, Р.Г. Ковач // Почвоведение. – 2004. – № 5. – С. 15-25.

8. Голубев, И.А. Проблема определения интенсивности водной эрозии почв в Сибири / И.А. Голубев // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 1. – С. 80-83.
9. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2018 году. – Казань, 2019. – 402 с.
10. Дербенцева, А.М. Курс лекций: эрозия и охрана почв (механическая деградация) / А.М. Дербенцева. – Владивосток.: Изд-во Дальневост. ун-та, 2006. – 88 с.
11. Добровольский, Г.В. Функции почв в биосфере и экосистемах / Г.В. Добровольский, Е. Д. Никитин. – М.: Наука, 1990. – 261 с.
12. Евдокимова, Т.И. Почвенная съемка / Т.И. Евдокимова. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 270 с.
13. Ермолаев, О.П. Ландшафты Республики Татарстан / О.П. Ермолаев, М.Е. Игонин, А.Ю. Бубнов, С.В. Павлова / Под ред. О.П. Ермолаева. – Казань: Изд-во «Слово», 2007. – 411 с.
14. Заславский, М.Н. Эрозиоведение / М.Н. Заславский. – М.: Высш. школа, 1983. – 320 с.
15. Кобзарь, Ж.Д. Мониторинг агроландшафтов в целях выявления эрозионных процессов / Ж.Д. Кобзарь // Сборник статей по материалам 10 Всероссийской конференции молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. Краснодар, 2017. – С. 726-727.
16. Козлов, Д.Н. Традиции и инновации в крупномасштабной почвенной картографии / Д.Н. Козлов, Н.П. Сорокина // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования: сборник статей. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. – С. 35-57.
17. Котлярова, О.Г. Ландшафтная система земледелия центрально-черноземной зоны / О.Г. Котлярова. – Белгород: Изд-во Белгородской ГСХА, 1995. – 293 с.

18. Кошелев, А.В. Цифровое картографирование почв с использованием данных SRTM / А.В. Кошелев // Известия Журн. Известия Нижневолжск. Агроун-го комплекса/ Сельскохозяй. науки. - 2018. – №4(52). – С. 1-8.
19. Ларионов, Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные факторы и количественные оценки / Г.А. Ларионов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 47 с.
20. Лисецкий, Ф.Н. Региональный анализ проявления процессов эрозии и почвообразования (на примере Причерноморья УССР) / Ф.Н. Лисецкий // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 1991. – №(4). – С. 54-58.
21. Литвин, Л.Ф. География эрозии почв сельскохозяйственных земель России / Л.Ф. Литвин. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 255 с.
22. Литвин, Л. Ф. Картографо-статистический метод оценки крутизны склонов / Л.Ф. Литвин, Н.Н. Миргородская // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях / Вторая межвуз. конф. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. – С. 53-54.
23. Лозовая, С.Ю. Анализ эрозионных процессов, характерных для Белгородской области / С.Ю. Лозовая, Н.М. Лозовой // Вектор ГеоНаук. – 2018. – № 1(3). – С. 88-94.
24. Мальцев, К.А. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях / К.А. Мальцев, В.Н. Голосов, А.М. Гафуров // Учен. зап. Казан. ун-та. – 2018. – Т.160, кн. 3. – С. 514-530.
25. Мансуров, Б.А. Интегральная оценка развития эрозии в Таджикистане / Б.А. Мансуров, Е.В. Косивцова, В.А. Попов // Агрехимический Вестник. – 2015. – № 3. – С. 50-52.
26. Минеев, А.Л. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации / А.Л. Минеев, Ю.Г. Кутинов, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова // Пространство и Время. – 2015. – № 3(21). – С. 278-291.

27. Мунтян, А.Н. Оценка антропогенной деградации почв под влиянием эрозионных процессов с использованием геоинформационных систем и методов дистанционного зондирования (на примере левобережья Днестра) / А.Н. Мунтян // Научные Ведомости. Сер. Естеств. науки. – 2016. – №11(232). – С. 129-138.
28. Носин, В.А. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользований / В.А. Носин, Ю.В. Федорин, Т.А. Фриев. – М.: Колос, 1973. – 75 с.
29. Общесоюзная инструкция по крупномасштабным почвенным и агрохимическим исследованиям территории колхозов и совхозов и по составлению почвенных карт территорий производственных колхозно-совхозных управлений. – М.: Колос, 1964. – 112 с.
30. Поцукевич, З.В. Микроэлементы показатель эродированности почв / З.В. Поцукевич // Оценка и картирование эрозионноопасных и дефляционноопасных земель. – М.: МГУ, 1973. – 370 с.
31. Рулев, А.С. Исследования проявления дефляции почв в условиях Волгоградской области / А.С. Рулев, А.М. Белякова, А.Н. Сарычев // Журн. Известия Нижневолжск. Агроун-го комплекса, Сельскохоз. науки, 2016. – №2(42). – С. 1-7.
32. Рязанов, С.С. Классификация земного покрова островов Куйбышевского водохранилища с использованием данных дистанционного зондирования / С.С. Рязанов, И.А. Сахабиев, Д.З. Галимов // Российский журнал прикладной экологии. – 2015. – № 3. – С. 50-55.
33. Садыхов, Ф.А. Влияние эрозионных процессов на изменение свойств почвы / Ф.А. Садыхов // Образование и наука в современных условиях. – 2015. – № 3. – С. 182-183.
34. Седых, В.А. Агроэкологическая оценка почвообразовательных процессов / В.А. Седых, В.И. Савич. – М.: РГАУ-МСХА, 2014. – 400 с.

35. Скрипчинский, А.В. Мониторинг эрозионных процессов средствами космической съемки / А.В. Скрипчинский, Ю.В. Бурым // Наука. Инновации. Технологии, 2016. – № 2. – С. 89-98.
36. Сластухин, В.В. Вопросы мелиорации склонов Молдавии / В.В. Сластухин. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1964. – 212 с.
37. Соболев, С.С. Почвенно-эрозионная карта СССР / С.С. Соболев, И.Ф. Садовников. – М: ГУГК, 1968. – 4 л.
38. Сорокина, Н.П. Опыт цифрового картографирования структуры почвенного покрова / Н.П. Сорокина, Д.Н. Козлов // Почвоведение. – 2009. – № 2. – С.1-14.
39. Тарарико, А.Г. Агрэкологические основы почвозащитного земледелия / А.Г. Тарарико. – Киев: Урожай, 1990. – 184 с.
40. Трофимец, Л.Н. Методы геоморфометрии, дистанционного зондирования и ГИС при изучении распределения радионуклида ^{40}K в почве распахиваемых склонов, осложненных ложбинной сетью / Л.Н. Трофимец, Е.А. Паниди // Журн. ИнтерКарто.ИнтерГИС, 2016. – С. 183-189.
41. Фокин, А.Д. Почва, биосфера и жизнь на Земле / А.Д. Фокин. – М.: Наука, 1986. – 138 с.
42. Цыбулька, Н.Н. Эродированные почвы: распространение, свойства, плодородие / Н.Н. Цыбулька // Мелиорация. – 2006. – № 2(56). – С. 146-158.
43. Чешев, А.С. Основы землепользования и землеустройства / А.С. Чешев, В.Ф. Вальков. – Ростов н/Д: Изд. центр «МарТ», 2002. – 544 с.
44. Шафигуллин, Б.У. Оценка состояния почв, подверженных склоновой эрозии, с использованием интегрального показателя / Б.У. Шафигуллин, П.Ю. Галицкая, С.Ю. Селивановская // Вестник РУДН. – 2011. – № 3. – С. 70-79.
45. Banko, G. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data and of Methods Including Remote Sensing Data in Forest

Inventory // International Institute for Applied Systems Analysis. Interim Report. - Laxenburg, 1998. – 42 p.

46. Barati, S. Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas / S. Barati, B. Rayegani, M. Saati, A. Sharifi, M. Nasri // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2011. – V. 14, I. 1. – P. 49-56.

47. Bhargava R., Levin I. (Eds.) Spectrochemical Analysis Using Infrared Multichannel Detectors. – Blackwell Publishing, 2005.

48. Burrough P.A., McDonnell R.A., Lloyd C.D. Principles of geographical information systems. – Oxford Univ. Press, 2015. – 432 p.

49. Boegh, E. Airborne Multi-spectral Data for Quantifying Leaf Area Index, Nitrogen Concentration and Photosynthetic Efficiency in Agriculture / E. Boegh, H. Soegaard, N. Broge, C. Hasager, N. Jensen, K. Schelde, A. Thomsen // Remote Sensing of Environment. – 2002. – V. 81, № 2–3. – P. 179-193.

50. Böhner, J. SAGA - application analysis and modeling / J. Böhner, K.R. McCloy, J. Strobl [eds.] // Göttinger Geographische Abhandlungen. – 2006. – Vol. 115. – 130 p.

51. Chavez, P.S. Image-based atmospheric correction—revisited and improved / P.S. Chavez // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1996. – №62 (9). – P.1025-1036.

52. Deng, Y. RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments / Y. Deng, C. Wu, M. Li, R. Chen // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2015. – № 39. – P. 40-48.

53. Desmet, P. A GIS procedure for automatically calculating the ULSE LS factor on topographically complex landscape units / P. Desmet, G. Govers // J. of Soil and Water Conservation. – 1996. – №51. – P. 427-433.

54. Drury, S. Image Interpretation in Geology / S. Drury. - London: Allen and Unwin, 1987. – 243 p.

55. Duan, X. Investigation method for regional soil erosion based on the

Chinese Soil Loss Equation and high-resolution spatial data: Case study on the mountainous Yunnan Province, China / X. Duan, Z. Bai, L. Rong, Y. Li, J. Ding, Y. Tao, J. Li, J. Li, W. Wing // *Catena*. - 2020. – №184. – P. 3-16.

56. Evans, L.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics / L.S. Evans // *Spatial Analysis in Geomorphology*. Chap. 2. – London: Methuen & Co. Ltd., 1972. – P. 17-90.

57. Foster, G.R. A Guide to Conservation Planning with the Revised Soil Loss Equation (RUSLE) / G.R. Foster, G.A. Weesies, K.G. Renard, J.P. Porter, D.C. Yoder // *Agriculture Handbook 703*. - U.S. Department of Agriculture, 1997. 385.

58. Hong-fen, T. Modelling and mapping soil erosion potential in China / T. Hong-fen, H. Jie, Z. Yue, Z. Lian-qing, S. Zhou // *Journal of Integrative Agriculture*. – 2019. – №18 (2). – P.251-264.

59. Huete, A. A soil adjusted vegetation index SAVI / A. Huete // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – № 25. – P. 295-309.

60. Huete, A. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices / A. Huete, K. Didan, T. Miura, E. Rodriguez, X. Gao, L. Ferreira // *Remote Sensing of Environment*, 2002. – № 83. – P. 195–213.

61. Hurni, H. Erosion-Productivity-Conservation Systems in Ethiopia // IV International Conference on Soil Conservation. - Maracay, 1985.

62. James, G. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R / G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani. - New York: Springer, 2013. – 418 p.

63. Kauth, R. The Tasselled Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT / R. Kauth, G. Thomas // *LARS Symposia*. – 1976. – Paper 159. – P. 41-51.

64. Key, C. H. Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index / C.H. Key, N.C. Benson // *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report, 2005. – RMRS-GTR-164-CD. – (P. LA1–LA51).

65. Krcho, J. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory / J. Krcho // *Acta Geographica. Universitatis Comenianae, Geographico-Physica.* – 1973. – № 1. – P. 7-233.
66. Landsat-8 (L8) data users handbook. South Dakota: EROS. - Sioux Falls, 2015. – 106 p.
67. Liaw, A. Classification and regression by randomForest / A. Liaw, M. Wiener // *R news.* – 2002. – № 2(3). – P. 18-22.
68. Louhaichi, M. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat / M. Louhaichi, M. Borman, D. Johnson // *Geocarto International.* – 2001. – №1. – P. 65-70.
69. Olson, K.R. Erosion patterns on cultivated and forested hillslopes near Ashukino / K.R. Olson, A.N. Gennadiyev, R.L. Jones, S.S. Chernyanskii // *Soil Science Society of America J.* – 2002. – V. 66. – № 1. – P. 193-201.
70. Panagos, P. A New European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water / P. Panagos, P. Borrelli, K. Meusburger // *Geosciences.* – 2015. – №5. – P. 117-126.
71. Qi, J. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) / J. Qi, A. Chehbouni, A. Huete, Y. Kerr, S. Sorooshian // *Remote Sensing of Environment.* - 1994. – № 48. – P. 119–126.
72. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing // R Foundation for Statistical Computing. - Vienna, 2018.
73. Rouse, J. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / J. Rouse, R. Haas, J. Schell, D. Deering // *Third ERTS Symposium.* NASA, 1973. – P. 309–317.
74. Sobrino, J. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 / J. A. Sobrino, J.C. Jiménez-Muñoz, L. Paolini // *Remote sensing of Environment.* - 2004. – №90 (4). – P. 434-440.
75. Sripada, R. Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-season Nitrogen Requirements in Corn / R. Sripada, R. Heiniger, J. White, A. Mejer // *Agronomy Journal.* – 2006. – № 98. – P. 968-977.

76. Sripada, R. Determining In-Season Nitrogen Requirements for Corn Using Aerial Color-Infrared Photography / R. Sripada: Ph.D. dissertation. -North Carolina State University, 2005. – 262 p.
77. Stefano, C.D. Testing spatially distributed sediment delivery model (SEDD) in a forested basin by Cesium-137 technique / C.D. Stefano, V. Ferro, P. Porto, S. Rizzo // J. of Soil and Water Conservation. - 2005. – 60. – P. 148–157.
78. Tamene, L. A landscape planning and management tool for land and water resources management: an example application in northern Ethiopia / L. Tamene, Q.B. Le, PLG. Vlek // Water Resources Management. - 2014. – №28(2). – P. 407–424.
79. Uchida, S. Applicability of satellite remote sensing for mapping hazardous state of land degradation by soil erosion on agricultural areas / S. Uchida // Procedia Environmental Sciences. – 2015. – №24. – P.29–34.
80. Vigiak, O. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins / O. Vigiak, A. Malagó, F. Bouraoui, M. Vanmaercke, J. Poesen // Sci. Total Environ. – 2015. – V. 538. – P. 855-875.
81. Walling, D.E. The sediment delivery problem / D.E. Walling // Hydrology. - 1983. – №65. – P. 209–237.
82. Wang, L. An Efficient Method for Identifying and Filling Surface Depressions in Digital Elevation Models for Hydrologic Analysis and Modeling / L. Wang, H. Liu // International Journal of Geographical Information Science. – 2006. – 20. 2. - P. 193–213.
83. Yang, Z. Impact of Band-Ratio Enhanced AWIFS Image to Crop Classification Accuracy / Z. Yang, P. Willis, R. Mueller // Proceedings of the Pecora 17 Remote Sensing Symposium. - Denver, 2008. – 11 p.
84. Корпоративный портал ТПУ: [Электронный ресурс] / Практическое задание № 2. URL: http://portal.tpu.ru/SHARED/v/VIDAYKINA/study_work/2/pr2.pdf, (дата обращения: 16.11.2019). – Текст. Изображение: электронные.

85. Хорошилова, А.И. [Электронный ресурс] / Дистанционное зондирование эрозионных процессов // Международная научно-техническая интернет-конференция. URL: <http://www.kadastr.org/conf/2013/pub/monitprir/dist-zondirov-eroz.htm>, (дата обращения: 05.11.2019). – Текст: электронные.

86. Mitasova, H. [electronic resource] / Army Training and Testing Area Carrying Capacity (ATTACC) LS factor Calculator User Manual, Version 1.0., 2000. URL: <http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/>. (дата обращения: 25.02.2020). – Текст: электронные.

87. QGIS Development Team [electronic resource] / QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation, 2018. URL: <http://qgis.osgeo.org> (дата обращения: 31.03.2020). – Текст. Изображение: электронные.