

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Базовая кафедра геоинформационных систем

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.И. Харук
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2019 г.

Магистерская диссертация

Анализ сезонной изменчивости оптических спектральных характеристик сельскохозяйственных полей по данным наземных и спутниковых измерений

09.04.02 Информационные системы и технологии

09.04.02.06 Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в мониторинге природных и антропогенных экосистем

Научный руководитель	_____	доцент, канд. биол.наук	_____
	подпись, дата	должность, ученая степень	Е.В. Федотова
Выпускник	_____		_____
	подпись, дата		Д.В. Емельянов
Рецензент	_____	ведущий математик	_____
	подпись, дата		А.А. Ларько
Нормоконтроль	_____		_____
	подпись, дата		Е.В. Федотова

Красноярск 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Описание параметров почвы.....	6
2 Применение метода дистанционного зондирования для определения характеристики почв.....	8
2.1 Лабораторная спектрорадиометрия.....	8
2.2 Полевая спектрорадиометрия.....	8
2.3 Спутниковая спектрорадиометрия.....	9
3 Объекты и методы.....	12
3.1 Объекты.....	12
3.1.1 «Погорельский бор».....	13
3.1.2 Опытное-производственное хозяйство «Минино».....	13
3.1.3 Поле в ОПХ «Минино» для исследования чистых паров.....	14
3.1.4 Учхоз «Миндерлинское».....	17
3.1.5 Лабораторные образцы.....	20
3.2 Оборудование (приборы).....	23
3.2.1 Лабораторный спектрорадиометр.....	23
3.2.2 Полевой спектрорадиометр.....	24
3.2.3 Данные дистанционного зондирования.....	24
3.2.3.1 Спектрорадиометр Terra/Modis.....	24
3.2.3.2 Система Landsat 8.....	25
3.2.3.3 Группировка PlanetScope.....	26
3.2.3.4 Прибор Sentinel-2.....	26
3.3 Методы расчетов.....	27
3.3.1 Обработка лабораторных данных.....	27
3.3.2 Обработка полевых и спутниковых данных.....	28
4 Входные данные для регрессии.....	29
4.1 Лабораторные спектры.....	30
4.2 Наземные и спутниковые спектры.....	31
5 Регрессионный анализ данных.....	33

5.1 Лабораторные спектры	33
5.2 Наземные и космические спектры	33
6 Карты, иллюстрирующие результаты регрессионного анализа.....	35
6.1 Карта полей по лабораторным данным	35
6.2 Карты полей по полевым данным	36
6.2.1 Регрессионная модель для полей ОПХ «Минино».....	36
6.2.2 Регрессионная модель для полей учхоза «Миндерлинское»	41
6.2.3 Создание ГИС при помощи регрессии по данным учхоза «Миндерлинское»	43
Заключение	47
Список использованных источников	48

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически во всех регионах России существует проблема устаревания почвенных карт. Вопрос определения агрохимии почвенного покрова очень актуален. Известно, что, в отличие от традиционной почвенной съемки, автоматическое картографирование почв методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) более перспективно [18].

Картирование мелкомасштабных пространственных изменений свойств почвы важно для каждого хозяйства. В своем исследовании Ahmed Z. и др [27] рассмотрели возможности применения методов дистанционного зондирования и геоинформационных системы при изучении пространственной изменчивости поверхностных почвы. Метод многомерной линейной регрессии использовался для связи компонентов почвы со спектральными данными со спутника Landsat TM 5. Анализ показал значительную ($p < 0,05$) взаимосвязь 4 и 6 каналов с процентом содержания ила ($R^2 = 0,724$) глины ($R^2 = 0,509$), в то время как содержание органических веществ было лучше всего смоделировано с использованием данных из диапазонов 1, 6 и 7 ($R^2 = 0,545$).

Содержание гумуса в почве является основным показателем ее плодородия, поэтому оценка его количества и состава необходима при проведении почвенно-экологического мониторинга и последующих агротехнических мероприятий по сохранению и восстановлению почвенного плодородия. Установлено, что значения коэффициента спектральной яркости в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (0,4-1,4 мкм) хорошо коррелируют с концентрацией органического вещества в почве [9]. К настоящему времени известен ряд методов моделирования содержания гумуса в верхнем воздушно-сухом слое почвы по данным ДЗЗ с применением парных, множественных, линейных и нелинейных регрессий, но использование линейной множественной регрессии является наиболее простым в применении [13].

Цель работы – исследование возможности использования материалов анализа космических изображений для изучения свойств почв и

пространственного распределения агрохимических свойств почв на контрольных участках.

Интерпретация оптической информации обеспечивается контактными методами с отбором почвенных образцов. При этом определяется содержания гумуса, влажности и гранулометрического состава почв.

Задачи:

1. Измерение спектров отражения образцов почв в лабораторных и полевых условиях, анализ данных.
2. Анализ спектральных характеристик исследуемых полей на космических снимках различных систем ДЗЗ.
3. Сопоставление результатов лабораторных и полевых исследований с результатами анализа данных дистанционного зондирования.
4. Определение границ применимости регрессионных моделей зависимости состава почвы от значений коэффициентов отражения в различных диапазонах спектра.
5. Создание ГИС с картами содержания компонентов почвы, построенными по моделям регрессионного анализа.

1 Описание параметров почвы

Каждая почва состоит из органических, минеральных и органоминеральных комплексных соединений. Основным источником минеральных соединений в почвах являются почвообразующие породы. Минеральное вещество составляет 80-90% всего веса почвы [8].

Органические соединения почвы формируются в результате жизнедеятельности растений, животных и микроорганизмов. В процессе почвообразования происходит накопление органического вещества на поверхности почвы и в ее верхних горизонтах. Разное соотношение процессов поступления растительных и животных остатков в почву и процессов их преобразования, а также разная напряженность этих процессов приводят к тому, что характер горизонтов накопления органического вещества отличается большим разнообразием.

Растительные и животные остатки, попадая в почву, претерпевают сложные изменения. Часть их полностью распадается до углекислоты, воды и простых солей (процесс минерализации). Другая часть преобразуется в сложные новые специфические органические вещества самой почвы — гумусовые вещества (процесс гумификации). Совокупность же специфических и неспецифических органических веществ почв, растительных и животных остатков разной степени разложения, кроме тех, которые еще не утратили тканевого строения, получила название гумуса, или перегноя.

Гумусовые вещества почвы состоят из гуминовых кислот, фульвокислот и гумина. Соотношения между ними определяют качественную характеристику гумуса разных типов почв. Обычно учитывается прежде всего отношение углерода гуминовых кислот (Сг) к углероду фульвокислот (Сф). В том случае, когда это отношение меньше 1, гумус фульватный; когда отношение Сг: Сф больше 1 — гумус гуматный.

Почвенные горизонты обычно характеризуются содержанием гумуса в процентах. Перегнойные и торфяные горизонты характеризуются потерей при

прокаливания. Потеря при прокаливании — убыль в весе почвы при нагревании ее до 450-500°C при свободном доступе воздуха за счет потери воды и органических веществ — выражается также в процентах [16].

Следующей важной характеристикой химических свойств почв является степень их кислотности. Она определяется в суспензиях, полученных при взбалтывании почв с водой (актуальная кислотность) или раствором KCl (обменная кислотность), и выражается в единицах pH. По величине степени кислотности различают кислые, нейтральные и щелочные почвы. В зависимости от степени кислотности определяют нуждаемость почв в известковании или гипсовании и нормы внесения извести и гипса.

Наряду с химическими свойствами важную роль в жизни почвы играют ее водно-физические свойства, такие, как водопроницаемость, влагоемкость, аэрация почвы и др.

Аэрация почвы в большой степени зависит от поступления воздуха, особенно кислорода, из атмосферы в поры почвы. Приток воздуха определяется в значительной мере порочностью почвы, т. е. объемом пор, заполненных почвенным воздухом (или почвенным раствором) [2].

2 Применение метода дистанционного зондирования для определения характеристики почв

2.1 Лабораторная спектрометрия

Мамаев и др. [14] не только описали методику измерения спектров отражения почв в лабораторных условиях, а также описали преимущества люминесцентных методов исследования почв.

Изучение спектральных характеристик почвы проводится различными способами. Yongcheng Y. И др. в своей работе изучали концентрацию марганца, что является проблемой, вызывающей серьезное беспокойство в области точного земледелия [35].

2.2 Полевая спектрометрия

На кафедре химии почв МГУ Орловым Д.С. [17] предпринималась попытка составить определитель почв по их спектральной отражательной способности на примере равнинных почв Болгарии. Данная территория выбрана потому, что на сравнительно небольшой территории ее почвенный покров очень разнообразен. Все почвенные горизонты разделили (которых оказалось 37) на три группы по величинам r_{750} , $r_{640-480}$ и r_S . Если по спектру отражения измерить эти величины, то потом, пользуясь специальной таблицей, легко определить, какой именно почве принадлежит исследуемая почвенная проба.

Шевырногов А.П. и др. в своей работе отработывали метод распознавания чистых паров по наземным дистанционным и спутниковым данным в течение вегетационного сезона [26]. Для проведения наземной спектрометрии использовался полевой спектрометрический комплекс, в результате чего были исследованы отражательные спектральные свойства чистых паров.

2.3 Спутниковая спектрорадиометрия

Для большинства сельскохозяйственных коллективов, арендных и фермерских хозяйств материалы крупномасштабных почвенных обследований были составлены более 30–40 лет назад областными проектными институтами по земельным ресурсам и землеустройству (ГИПРОЗЕМ) и сейчас нуждаются в обновлении, корректировке и актуализации. За последние годы накоплены новые знания о распространении и генезисе почв, появились новые методы и технологии цифровой почвенной картографии (ЦПК), геоморфометрии и педометрики, что создает предпосылки по переработке и обновлению устаревших материалов крупномасштабных почвенных обследований [28].

Агрохимический метод для определения пространственного распределения типов почв является трудоемким. Поэтому для этой цели предлагается использование методов ДЗЗ.

Для принятия одного из наиболее важных решений, принимаемых агрономической службой – решения о сроках проведения весеннего сева сельскохозяйственных культур используются спутниковые ДЗЗ по температуре и влажности верхнего слоя почвы (спутники серий NOAA, MetOp) и MODIS (спутники EOS-Aqua, Terra), а также наземные измерения этих параметров на метеопунтах. При этом решение принимается на основе критерия, в качестве которого используются прогнозы показателя всхожести посевов сельскохозяйственных культур. Для построения таких прогнозов используется динамическая модель температуры и влажности верхнего слоя почвы и модель показателя всхожести. Обеспечение высокой точности оценивания и прогнозов температуры и влажности почвы достигается использованием алгоритма оптимальной фильтрации, который реализуется путем комплексирования наземных измерений и данных ДЗЗ [15].

Вопросу определения состава почвы по ее оптическим свойствам на протяжении сорока лет посвящают свои работы многие ученые [1, 7]. Отечественными и зарубежными специалистами разрабатываются методики

применения космической съемки для оценки гранулометрического состава почв, как на качественном, так и количественном уровнях.

В современных работах, посвящённых вопросу агрохимии почв, подробно описываются методы определения и картирования почвенных снимков [13-14, 20].

Виноградов [1] привел статистические данные и аналитические зависимости для дистанционной индикации содержания гумуса в почве. Он выделяет пять градаций состояния гумуса по оптической плотности и подтверждает экспоненциальный характер зависимости оптической плотности фотоизображения от содержания гумуса в почве. Заварзина и др. [7] определили наиболее подходящие длины волн спектра отражения для построения карт содержания гумуса в почве. Многие последующие работы основаны на их исследованиях.

В своем исследовании Кротов Д.Г. [10] установил нелинейную связь между яркостью красного канала при дистанционном зондировании Земли и содержанием гумуса в пахотном горизонте серой лесной почвы. Коэффициент детерминации для уравнения оказался очень высоким ($R^2 = 0,965$). Расчеты содержания гумуса с его использованием практически совпали со средними значениями, полученными при независимом определении содержания гумуса в смешанных образцах, что отчасти подтверждается и данным исследованием.

Украинский и др. [20] описали подход в определении гранулометрического состава при помощи фильтров программного продукта ENVI. Малышевский и др. [13] описали метод моделирования содержания гумуса в почве сельскохозяйственного поля при помощи снимка ДЗЗ и уравнения регрессии.

Rogge D. и др. [33] продемонстрировали способность автоматизировать процессы обработки больших баз данных изображений для создания многоспектральных композитных базовых слоев данных, при помощи которых можно проводить крупномасштабный анализ почвы. Функциональность SCMaP демонстрируется с использованием снимков Landsat по Германии с 1984 по 2014 год, примененных в течение 5 лет. Создавались три основных уровня продукта,

которые позволяют проводить долгосрочную оценку и распределение почв, включая распределение открытых почв, статистическую информацию, связанную с использованием и интенсивностью почв, а также создание композитных изображений спектра отражения почв. Полученные в результате карты предоставляют полезную дополнительную информацию о почвах с открытыми композитами отражательной способности почвы, показывающими высокий пространственный охват, который хорошо коррелирует с существующими картами почвы и основными геологическими структурными областями. Все данные работы являются наиболее цитируемыми в этой области исследования.

3 Объекты и методы

Объектами исследования являлись образцы почв, отобранные в четырех точках земледельческой зоны в окрестностях г. Красноярск, а также сельскохозяйственные поля, расположенные в ОПХ «Минино» Емельяновского района и на землях ООО учхоз «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края.

Спектральные характеристики изучаемых объектов исследовались при помощи лабораторного и полевого спектро радиометров, а также спутниковой спектроскопией.

3.1 Объекты

Расположение объектов представлено на рисунке 1.

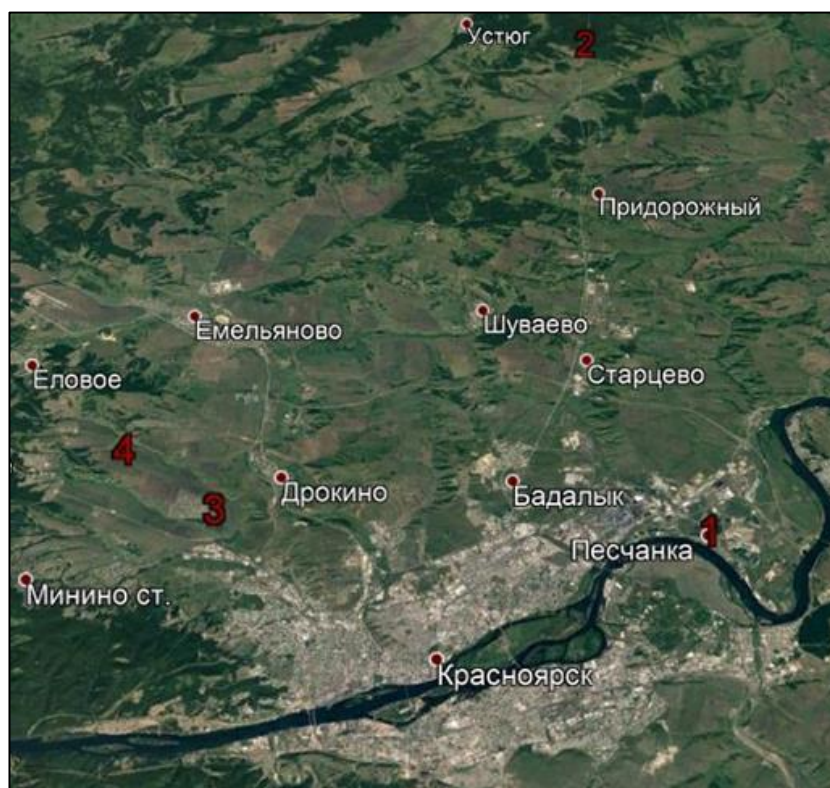


Рисунок 1 – Карта отбора образцов почв: 1 – пойма Енисея, 2 – «Погорельский бор», 3 – порода ОПХ «Минино», 4 – чернозем «Минино»

3.1.1 «Погорельский бор»

Район «Погорельского бора» входит в лесостепную зону. Рельеф местности слабохолмистый, с пологими склонами. Окружающая местность покрыта смешанным лесом, с преобладанием хвойных пород. В центральной части «Погорельского бора» почвообразующие породы представлены серовато-желтыми делювиальными и аллювиально-делювиальными суглинками и супесями с включениями кварцевой гальки. В западной части, как на положительных элементах рельефа, так и на отрицательных широко распространены тонкопылеватые аллювиально-делювиальные карбонатные и бескарбонатные суглинки. Последние переслаиваются тонкозернистыми песками и суглинками. На выровненных безлесных участках почвообразующие породы представлены коричневато-желтыми карбонатными суглинками. Все почвообразующие породы подстилаются юрскими отложениями. Одним из важнейших факторов почвообразования является растительность. Распределение почвенного покрова соответствует распределению растительного покрова [11, с. 9].

3.1.2 Опытное-производственное хозяйство «Минино»

По природному районированию территория стационара «Минино» Емельяновского района расположена в округе Красноярской лесостепи, в наиболее остепнённой южной её части. Красноярская лесостепь простирается относительно узкой полосой вдоль левого берега Енисея и представляет собой полого-увалистую наклонную предгорную равнину. Рельеф пахотных массивов ровный и увалистый. Микрорельеф выражен слабо. Геоморфологические особенности Красноярской лесостепи благоприятны для использования этой территории в качестве пашни. Почвы представлены в основном чернозёмами – выщелоченным и обыкновенным [11, с. 109].

Климат территории хозяйства резко континентальный. По данным метеостанции Минино средняя многолетняя температура воздуха $-0,7^{\circ}\text{C}$. Наиболее тёплым месяцем является июль, наиболее холодным – январь. Период со среднесуточной температурой воздуха выше 0°C начинается с середины апреля и продолжается 182-192 дня.

Продолжительность вегетационного периода 123 дня. Самые поздние возвратные холода возможны 14 июня, самые ранние осенние – 22 августа. Сумма положительных температур (май-август) достигает 2056°C . Сумма активных температур ($+10^{\circ}\text{C}$ и более) – $1600-1800^{\circ}\text{C}$. Продолжительность безморозного периода составляет 120 дней.

Среднегодовое количество осадков 372 мм, из них за вегетационный период выпадает более 60%, что относит территорию к зоне недостаточного увлажнения [11, с. 125-140.].

3.1.3 Поле в ОПХ «Минино» для исследования чистых паров

Для получения спектральных характеристик почвы на чистых парах, оценки их засоренности и агрохимического состояния использовался участок площадью 25 га – чистый пар после зерновых культур. 8 августа 2018г на данной площади с географической привязкой отобрано 108 почвенных образцов (рис. 2). Параллельно изучалась отражательная способность почв. В почвенных образцах определялись агрохимические показатели (гумус, подвижный гумус ($\text{C}_{0.1\text{н. NaOH}}$, $\text{pH}_{\text{сол.}}$, Hг , N-NO_3 , подвижные P_2O_5 , K_2O) и влажность почвы (табл. 1).

Почва опытного парового участка представлена черноземом выщелоченным, маломощным слабогумусированным среднедеградированным тяжелосуглинистого гранулометрического состава. Предшественник – зерновые культуры (яровая пшеница).

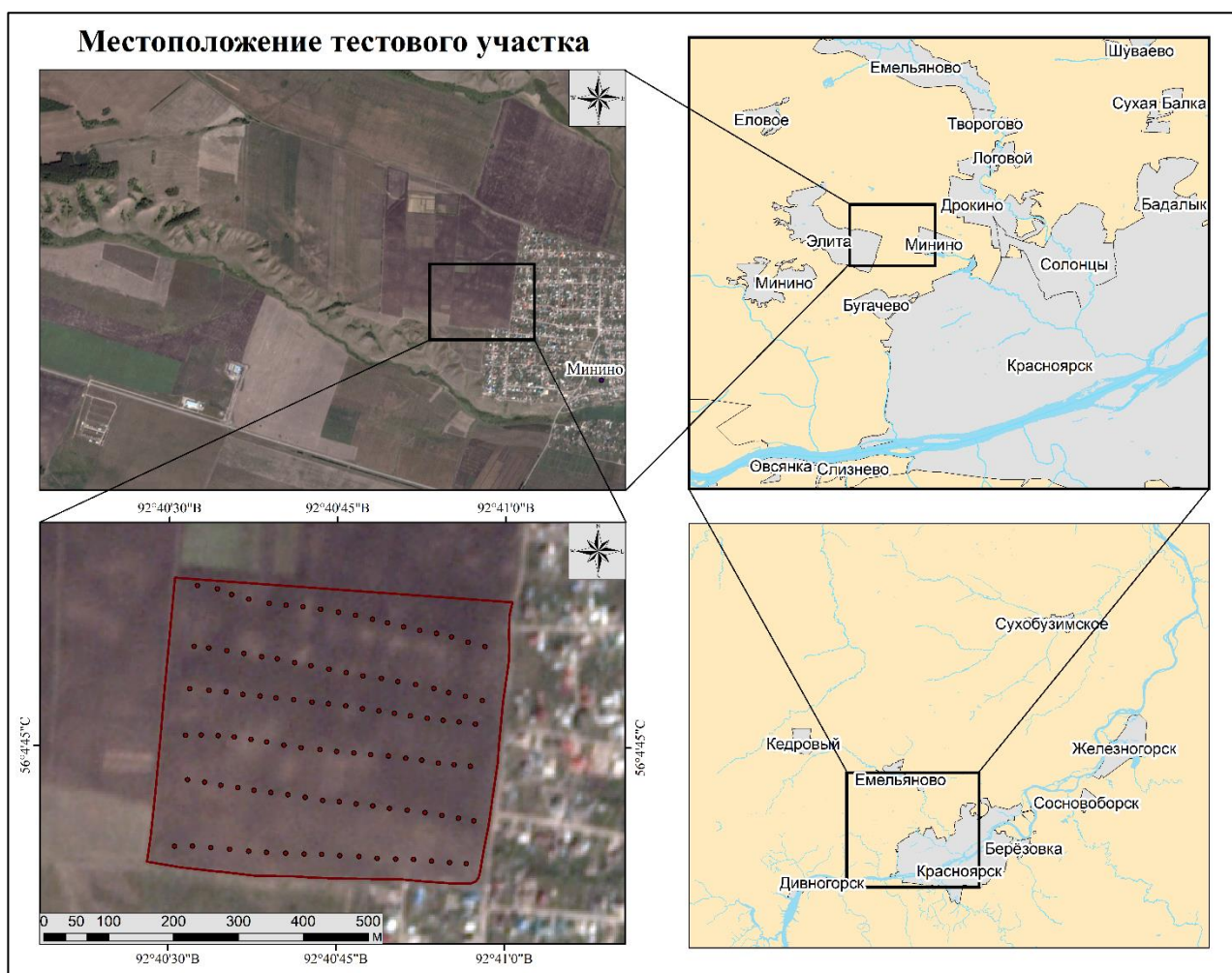


Рисунок 2 – Опытное паровое поле в ОПХ Минино с указанием схемы отбора образцов

Обработка пара включала следующие операции:

- осенью, после уборки зерновых, зяблевая вспашка с оборотом пласта;
- весной следующего года, при наступлении физической (технологической) спелости почвы, культивация с боронованием (КПЭ-3,8 + зубчатая борона) с целью влагозадержания и борьбы с сорняками;
- дискование тяжёлым дискатором в конце июля.

Отбор почвенных образцов и полевые спектральные измерения точек отбора проводились после дискования – 8 августа 2018 г., поэтому сорная растительность в поле пара, отсутствовала.

Таблица 1 – Агрохимические показатели (слой 0-20 см) и влажность почвы (слой 0-5 см) поля чистого пара

Показатели	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартная ошибка	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %
Влажность, % (0-5см)	4,74	2,20	11,90	0,17	1,78	37,61
Гумус, %	2,97	1,31	5,64	0,08	0,86	28,83
$C_{0, \text{ин. NaOH}}$, мг/100 г	110	12	264	0,5	5,6	50,79
$pH_{\text{сол.}}$	6,54	5,90	7,10	0,03	0,31	4,67
$Hг$, мг·экв/ 100 г.	1,04	0,48	2,03	0,03	0,36	34,41
$N - NO_3$, мг/кг	3,34	1,30	9,10	0,15	1,56	46,72
P_2O_5 , мг/100 г	18,23	5,20	35,40	0,54	5,65	31,01
K_2O , мг/100 г	14,60	10,50	22,00	0,19	1,98	13,53

Аналитическая работа была выполнена со 108 почвенными образцами. Содержание гумуса на обследуемом участке варьировало от 1,31 до 5,64% [3]. Среднее содержание гумуса составило 2,9%, что характеризует исследуемый чернозём как слабогумусированный (<4%) с низким содержанием органического вещества. Низкое содержание гумуса обусловлено развитием комплексной эрозии в средней степени.

Степень кислотности $pH_{\text{сол.}}$ отобранных образцов изменялась в пределах от 5,90 до 7,10 со средним значением 6,54 ед., которое характеризует данную почву по степени кислотности как нейтральную [5]. Среднее значение гидролитической кислотности – 1,04 мг·экв/100 г (0,48- 2,03) подтверждает потенциальную нейтральность обследуемой почвы.

Содержание нитратного азота в отобранных образцах колебалось в пределах от 1,30 до 9,10 мг/кг, со средним значением в 3,34 мг/кг почвы, что указывает на очень низкую степень обеспеченности почвы нитратным азотом [6].

Среднее содержание в обследуемой почве подвижного фосфора по Чирикову [4] составляет 18,2 мг/100 г почвы, что характеризует степень

обеспеченности этим элементом как среднюю. Обеспеченность подвижным калием по общепринятым градациям высокая со средним значением 14,60 мг/100 г почвы по Чирикову.

Анализируя коэффициенты вариации агрохимических показателей исследуемой почвы, можно отметить наибольшую пестроту почвенного покрова по следующим агрохимическим показателям: гумус, подвижный гумус, гидролитическая кислотность, нитратный азот и подвижный фосфор. К наиболее стабильным агрохимическим показателям относятся $pH_{\text{сол}}$ и содержание K_2O по Чирикову.

Целый ряд агрохимических свойств в пределах парового поля менялся очень существенно: содержание гумуса и гидролитическая кислотность в 4,2-4,3 раза, количество нитратного азота и подвижного фосфора в 6,8-7,0 раз, а содержание подвижного гумуса в 22 раза. Более спокойным распределением отличались pH солевой суспензии и содержание обменного калия. Таким образом, выявлена высокая степень пространственной дифференциации парового поля, обусловленная развитием выраженного мезо- и микрорельефа, неглубоким залеганием почвообразующих пород сартанской свиты, имеющих ряд неблагоприятных свойств, хозяйственной деятельностью (развитие эрозии, припахивание малогумусного горизонта почвы).

3.1.4 Учхоз «Миндерлинское»

Сравнение результатов модели регрессии, рассчитываемых по данным полей ОПХ «Минино», проводилось на примере почв, распространенных в землепользовании учхоза «Миндерлинское» Красноярского государственного аграрного университета. Территория хозяйства площадью 4,5 тыс. га находится на широте $56,4^\circ$ с.ш. в центральной части Красноярской лесостепи, расположенной на стыке юго-восточной и восточной окраины Западно-Сибирской низменности и предгорной равнины Восточного Саяна. По геоморфологическому строению, степени и характеру эрозионного расчленения

эта территория относится к Приенисейской холмисто-увалистой среднерасчлененной денудационной равнине, по агроклиматическому районированию – к умеренному поясу и холодно-умеренному подпоясу с резкими суточными и годовыми колебаниями температуры [19].

Для получения информации об агрохимическом состоянии почв, на некоторых полях в разное время было отобрано 26 проб (рис. 5). В почвенных образцах определялись агрохимические показатели (гумус, $pH_{\text{сол.}}$) и влажность почвы.

Почвы учхоза представлены черноземами выщелоченными среднегумусными мало- и среднемощными и тучными среднемощными. Распространенные по южным и западным склонам невысоких увалов и холмов, занимают 23% от общей площади. Данные почвы более всего подвержены дефляции. Почвообразующими породами для них служат лессовидные суглинки и глины, обуславливая их тяжелосуглинистый гранулометрический состав. На крутых южных склонах формируются легкосуглинистые почвы с признаками эродированности. В основном выщелоченные черноземы сочетаются с обыкновенными среднегумусными и лугово-черноземными оподзоленными почвами. Оподзоленных черноземов мало – менее 1% от площади хозяйства.

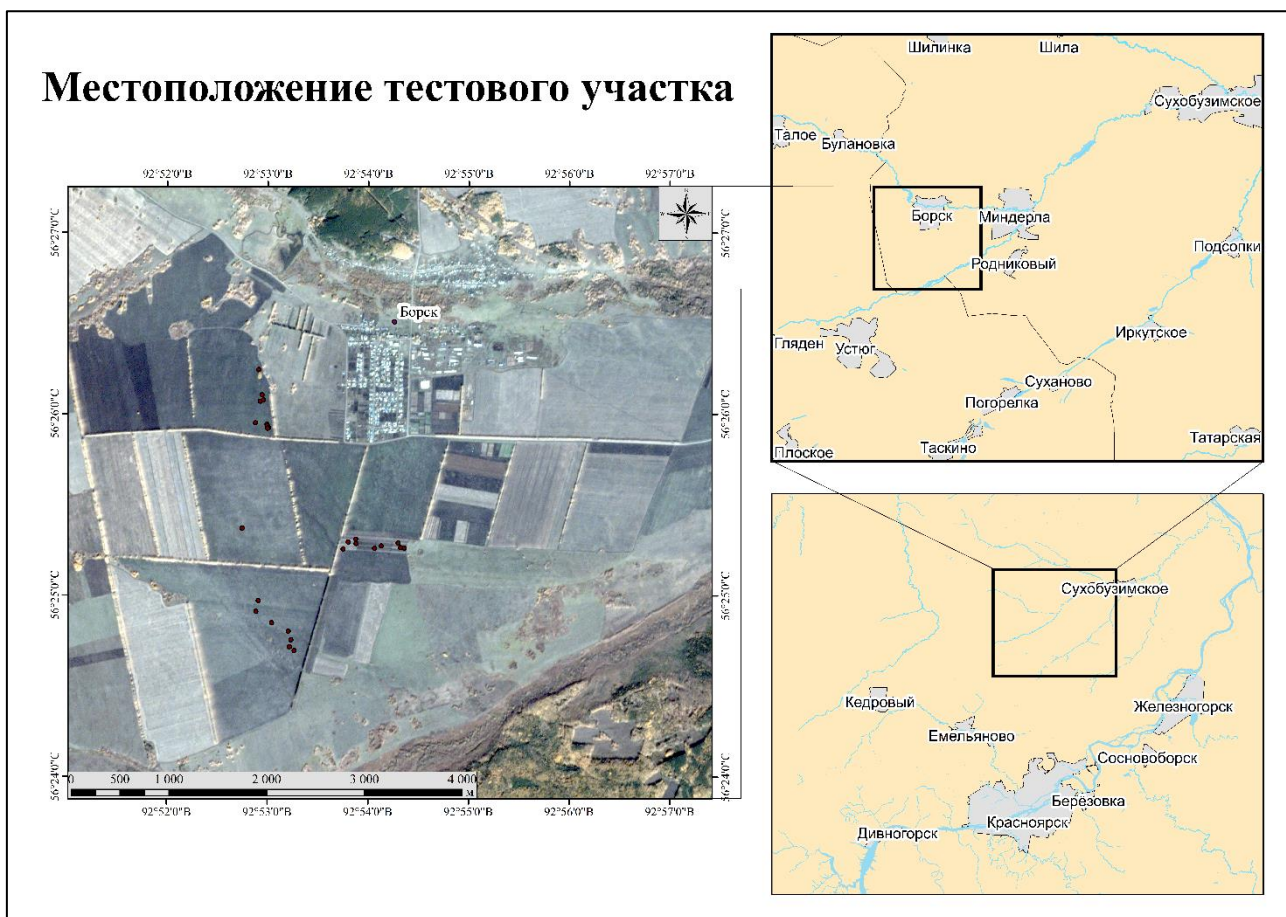


Рисунок 5 – Поля учхоза «Миндерлинское» с указанием точек отбора почвенных образцов

Холмисто-увалистый рельеф территории учхоза обуславливает значительную комплексность почвенного покрова. Суммарная площадь однородных контуров составляет только 29% территории. Элементарные почвенные структуры (ЭПС) почвенного покрова представлены четырьмя группами: зональные, полугидроморфно-зональные, полугидроморфно-подчиненные и пойменные. Крутые южные и западные склоны, составляющие 12% площади территории, подвержены слабой дефляции. Слабосмытые почвы, формирующиеся на делювиальных глинах нижних частей склонов, занимают 5% общей площади. В целом почвенный покров землепользования обладает слабой контрастностью. Степень его дифференциации для гетерогенных контуров – средняя и умеренная.

В структуре почвенного покрова землепользования учхоза «Миндерлинское» значительную долю (21%) составляют ареалы мощных темно-серых оподзоленных почв в комплексе с лугово-черноземными оподзоленными. Эти почвы сформированы на делювиальных глинах и имеют тяжелосуглинистый и легкосуглинистый гранулометрический состав. Темно-серые почвы распространяются на вершинах плоских увалов или на средних частях северных и восточных склонов. Лугово-черноземные почвы занимают шлейфы и понижения склонов. Серые оподзоленные почвы, доля которых составляет около 22% от общей площади хозяйства, приурочены к наиболее высоким абсолютным отметкам: вершинам высоких увалов, верхним частям склонов северной экспозиции. Здесь преобладают среднеспособные в комплексе с маломощными видами [25].

3.1.5 Лабораторные образцы

Для изучения спектральных характеристик почв в лабораторных условиях был выбран модельный опыт №1 заложенный сотрудниками Красноярского Научно-Исследовательского Института Сельского Хозяйства (табл. 2). Данный опыт состоял из образцов, представленных почвообразующими породами и почвами, которые были отобраны в пойме р. Енисей, в заказнике «Погорельский бор» и ОПХ (опытно-производственное хозяйство) «Минино» (рис. 1). Модельный опыт первоначально складывался из пяти вариантов, каждый из которых состоял из четырех образцов. В дальнейшем эти варианты смешивали друг с другом для получения новых вариантов с разным содержанием гумуса, $pH_{\text{сол}}$ и гранулометрическим составом (табл. 2). В результате получено 12 новых вариантов. Новые варианты также разделяли на четыре образца, вследствие чего было получено всего 68 образцов.

Анализируемые образцы имели разный гранулометрический состав, $pH_{\text{сол}}$ и сильно различались по содержанию гумуса (табл. 2, 3).

Так, содержание гумуса колебалось в очень широких пределах, от 0,37 до 8,50%, с переходом через 1, 3, 5%. Содержание физической глины изменялось от 8,6 до 47,5%, а разновидности были представлены связным песком, супесью, легким, средним и тяжелым суглинками. рН солевой суспензии также было различным, от 5,45 до 8,00 ед., что указывает на слабокислую, близкую к нейтральной, нейтральную, слабощелочную и щелочную реакцию среды.

Таблица 2 – Результаты аналитической работы (Модельный опыт 1, повторность 4-х кратная, закладка 20.07.2017 г.)

Вариант опыта (место отбора)	№ образцов	Гумус, %	рН _{сол}	Физ. глина, %	Разновидность по гранулометрическому составу
1 (пойма Енисея)	1-4	0,37	8,00	9,5	связный песок
2 (Погорельский бор)	5-8	0,37	5,45	14,9	супесь
3 (Погорельский бор + порода ОПХ Минино)	9-12	0,40	7,35	26,3	лёгкий суглинок
4 (порода ОПХ Минино)	13-16	0,73	7,25	46,4	тяжелый суглинок
5 (чернозем Минино)	17-20	8,50	6,75	46,4	тяжелый суглинок



Рисунок 2 – Внешний вид модельного опыта №1

Таблица 3 – Результаты аналитической работы (Модельный опыт 2, повторность 4-х кратная, закладка 20.07.2017 г.)

Вариант опыта	№ образцов	Гумус, %	pH _{сол}	Физ. глина, %	Разновидность по гранулометрическому составу
1	21-24	0,95	7,10	8,6	связный песок
2	25-28	2,95	6,75	19,0	супесь
3	29-32	4,34	6,73	23,6	лёгкий суглинок
4	33-36	1,33	6,35	16,2	супесь
5	37-40	2,44	6,43	21,6	лёгкий суглинок
6	41-44	4,69	6,53	29,3	лёгкий суглинок
7	45-48	1,17	6,65	27,4	средний суглинок
8	49-52	2,69	6,85	30,4	средний суглинок
9	53-56	4,54	6,95	35,6	средний суглинок
10	57-60	1,82	7,18	45,4	тяжелый суглинок
11	61-64	3,76	7,15	47,5	тяжелый суглинок
12	65-68	5,65	7,15	47,3	тяжелый суглинок



Рисунок 3 – Внешний вид модельного опыта №2

Анализ всех полученных данные позволяет утверждать, что в опытах использованы самые различные почвы и породы с широким спектром варьирования основных свойств.

3.2 Оборудование (приборы)

3.2.1 Лабораторный спектрометри

Для проведения спектральной съемки в лабораторных условиях образцов почв использовались спектрометры Flame-T-VIS-NIR-ES компании Ocean

Optics. Данный прибор имеет габариты 88.9×63.5×31.9 мм, вес 265 г и настроен для работы в диапазоне от 350 до 1000 нм. Имеется 3648 элементов детектора и дифракционная решётка из 14 вариантов: от УФ до ближнего ИК-диапазона. В качестве входной апертуры есть сменная входная щель размером 5, 10, 25, 50, 100, 200 мкм, а также используется разъем без щели. Оптическое разрешение ~0.1-10 нм (FWHM), в зависимости от конфигурации оптического модуля.

Для записи и обработки данных требуется специальное ПО. В данном случае это программа OceanView компании Ocean Optics. Данной программное обеспечение доступно на всех операционных системах и предоставляет множество автоматизированных функций для различных задач спектрометрии и их обработки.

3.2.2 Полевой спектрорадиометр

Наземные измерения проводились спетктрорадиометром Spectral Evolution PSR 1100F для верификации спутниковой информации. Данный прибор настроен для работы в диапазоне от 320 до 1100 нм с углом обзора 25°. В качестве входной апертуры используется щель размером 50 мкм. Имеется 512-элементная фотодиодная матрица Si с размером пиксела 25мкм×2,5мкм с фиксированной решеткой.

Запись данных происходит при помощи портативного компьютера, на котором хранятся все данные. Выходные данные представляют собой текстовый документ в формате .txt.

3.2.3 Данные дистанционного зондирования

3.2.3.1 Спектрорадиометр Terra/Modis

Спектрадиометр для получения изображений с умеренным разрешением (The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS) представляет

собой сенсор [22], который был запущен на орбиту Земли НАСА в 1999 году на борту спутника Terra (EOS AM). Прибор собирает данные в 36 спектральных диапазонах в диапазоне длин волн от 0,4 до 14,4 мкм и с различным пространственным разрешением (2 канала с разрешением 250 м, 5 каналов – 500 м и 29 каналов – 1 км). Интервал повторения каждые 1-2 дня. Данные представляются в открытом доступе на сайте National Aeronautics and Space Administration [31].

Для данного исследования использовались первые два канала с пространственным разрешением 250 м, спектральные диапазоны которых 620-670 (видимый красный) нм и 841-876 (ближний инфракрасный) нм.

3.2.3.2 Система Landsat 8

Спутниковая система Landsat-8 OLI состоит из двух основных сегментов: сенсора для оперативного мониторинга Земли (Operation Land Imager – OLI) и инфракрасного датчика (Thermal Infrared Sensor – TIRS) [21]. Оба датчика одновременно собирают мультиспектральные цифровые изображения поверхности суши, включая прибрежные районы, полярный лед, острова и континентальные районы с интервалом раз в 16 дней.

Прибор OLI измеряет видимую, ближнюю инфракрасную и коротковолновую инфракрасную части спектра. Его данные имеют 15-метровое панхроматическое и 30-метровое мультиспектральное пространственное разрешение по полосе шириной 185 км.

В TIRS используются датчик Quantum Well Infrared Photodetectors для обнаружения длинных волн света, излучаемого Землей, интенсивность которого зависит от температуры поверхности. Получение данных происходит в двух каналах, 10 и 11, с пространственным разрешением 100 м, с длинами волн 10,3-11,3 мкм и 11,5-12,5 мкм соответственно (табл. 4).

Таблица 4 – Характеристики спектрорадиометра Landsat 8

Спектральный канал	Длины волн, нм	Пространственное разрешение, м
Канал 1 — побережья и аэрозоли	433—453	30
Канал 2 — синий	450—515	30
Канал 3 — зелёный	525—600	30
Канал 4 — красный	630—680	30
Канал 5 — ближний ИК	845—885	30
Канал 6 — ближний ИК	1560—1660	30
Канал 7 — ближний ИК	2100—2300	30
Канал 8 — панхроматический	500—680	15
Канал 9 — перистые облака	1360—1390	30
Канал 10 — дальний ИК	1030 — 1130	100
Канал 11 — дальний ИК	1150 — 1250	100

Данные представляются в открытом доступе на сайте U.S. Geological Survey [34].

3.2.3.3 Группировка PlanetScope

Крупнейшая группировка спутников компании PlanetScope поставляет данные высокого пространственного разрешения (3 м) на ежедневной основе со спутников Dove [32]. Спектральные каналы представлены четырьмя диапазонами: 455-515 нм, 500-590 нм, 590-670 нм, 780-860 нм. Данные предоставляются на коммерческой основе. Для студентов и научных работников существуют специальные условия, при которых бесплатно разрешается скачивать снимки на 10000 км² в месяц. Размер одной сцены 50000 м².

3.2.3.4 Прибор Sentinel-2

Семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства Sentinel-2 является миссией по мониторингу поверхности Земли, которая систематически получает оптические изображения с высоким пространственным разрешением (от 10 до 60 м) [23].

Мультиспектральные данные представлены 13 каналами в видимой, ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной частях спектра (табл. 5).

Таблица 5 – Характеристики прибора Sentinel-2

Спектральный канал	Центр канала, нм	Ширина канала, нм	Пространственное разрешение, м
Канал 1 — побережья и аэрозоли	442,7	21	60
Канал 2 — синий	492,4	66	10
Канал 3 — зелёный	559,8	36	10
Канал 4 — красный	664,6	31	10
Канал 5 – красный барьер фотосинтеза	704,1	15	20
Канал 6 – красный барьер фотосинтеза	740,5	15	20
Канал 7 – красный барьер фотосинтеза	782,8	20	20
Канал 8 — ближний ИК	832,8	106	10
Канал 8А — узкая полоса ближнего ИК	864,7	21	20
Канал 9 – водяной пар	945,1	20	60
Канал 10 – SWIR – перистые облака	1373,5	31	60
Канал 11 – SWIR	1613,7	91	20
Канал 12 – SWIR	2202,4	175	20

Интервал повторения каждые 2-5 дней. Данные представляются в открытом доступе на сайте U.S. Geological Survey [34].

3.3 Методы расчетов

Работа по построению карт проходила в несколько этапов. Для начала проводилась предварительная обработка данных в MS Excel, затем полученные результаты использовались в работе с ArcMap. После этого, конечные статистические показатели и графики подсчитывались в MS Excel.

3.3.1 Обработка лабораторных данных

Спектры отражения лабораторных образцов почв сохранялись в отдельных текстовых файлах с разрешением .txt. Данные файлы переносились в книгу MS

Excel при помощи специального макроса. Далее, данные обрабатывались. При помощи пакета анализа «Анализ данных» подсчитывались коэффициенты регрессии, а также статистические показатели – множественный коэффициент детерминации и точность модели (Root Mean Square Error). В качестве входного интервала Y служили значения компонентов почвы, а в качестве интервала X – значения спектров отражения в разных диапазонах.

Для построения карт использовалось приложение ArcMap программного продукта ArcGIS. При помощи инструмента «Калькулятор растра» полученные коэффициенты умножались на каналы спутника Landsat-8 OLI. Выходным файлом являлся новый растр, в каждом пикселе которого содержалась информация о содержании исследуемого компонента почвы.

3.3.2 Обработка полевых и спутниковых данных

Спектры отражения образцов почв полученные в полевых условия также сохранялись в отдельных текстовых файлах с разрешением .txt. Каждый файл сохранял координаты измерений. Далее, используя макрос, данные из файлов переносились в MS Excel. Полученный файл сохранялся в формате .csv. Данный файл открывался в ArcMap и пересохранялся в формате shape-файла для последующего отображения точек измерения на карте.

При помощи инструмента «Извлечь мультисзначения в точки» значения пикселей, куда попадали точки измерений, извлекались в слой с точками отбора образцов. Далее из атрибутивной таблицы точечного слоя извлеченные данные копировались в MS Excel для проведения регрессионного анализа. Полученные коэффициенты регрессии умножались в ArcMap при помощи инструмента «Калькулятор растра» на каждый канал спутника. Выходным файлом являлся новый растр, в каждом пикселе которого содержалась информация о содержании исследуемого компонента почвы.

4 Входные данные для регрессии

К настоящему времени известен ряд методов моделирования содержания компонентов в верхнем воздушно-сухом слое почвы по данным ДЗЗ с применением парных и множественных, линейных и нелинейных регрессий [12, 24]. В данной работе использовалась линейная регрессионная зависимость вида:

$$G=A+B_1 \times X_1+B_2 \times X_2+\dots+B_n \times X_n, \quad (1)$$

где G – концентрация агрохимического компонента почвы; B_n , A – параметры модели (регрессии); X_n – спектральные яркости в соответствующих спектральных диапазонах (каналах).

На отбираемых спутниковых данных содержится большое количество пикселей с открытыми почвами, но также на нем присутствуют растительный покров и наземные объекты (населенные пункты, дороги). Данные от таких элементов могут затруднить тематическую обработку. Такие объекты исключались из анализа путем разработки маски в ArcGIS. Пиксели с растительностью извлекались на основе применения индекса NDVI по уравнению 2 (Normalized Difference Vegetation Index) [29]. Значение NDVI варьирует от -1 до +1. Однако значения NDVI 0,2 и выше указывают на присутствие растительности [30]. Точные границы населенных пунктов и дорог определены по картам подготовленным Институтом Вычислительного Моделирования СО РАН (<http://gis.krasn.ru/blog/catalog>). Таким образом, объединение этого набора данных использовалось для подготовки неаналитической маски, включающей естественную растительность, населенные пункты и дороги.

$$NDVI=\frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)}, \quad (2)$$

где NIR – это волны в ближнем инфракрасном диапазоне, а Red – в красном.

4.1 Лабораторные спектры

Во время лабораторных измерений оба имеющихся опыта объединили в один. Каждый из 17 образцов были разделены еще на 4 повторности. Вследствие чего получилось 68 образцов. Для каждого образца снимался спектр отражения лабораторным спектро радиометром. Путем усреднения получено 17 спектров отражения.

Так как лабораторные спектральные данные впоследствии сравниваются со спутниковыми, для построения уравнения регрессии использовались те диапазоны спектрометра, которые соответствовали каналам прибора Landsat-8 OLI. На рисунке 5 представлены спектральные диапазоны лабораторного спектрометра и приборов ДЗЗ.

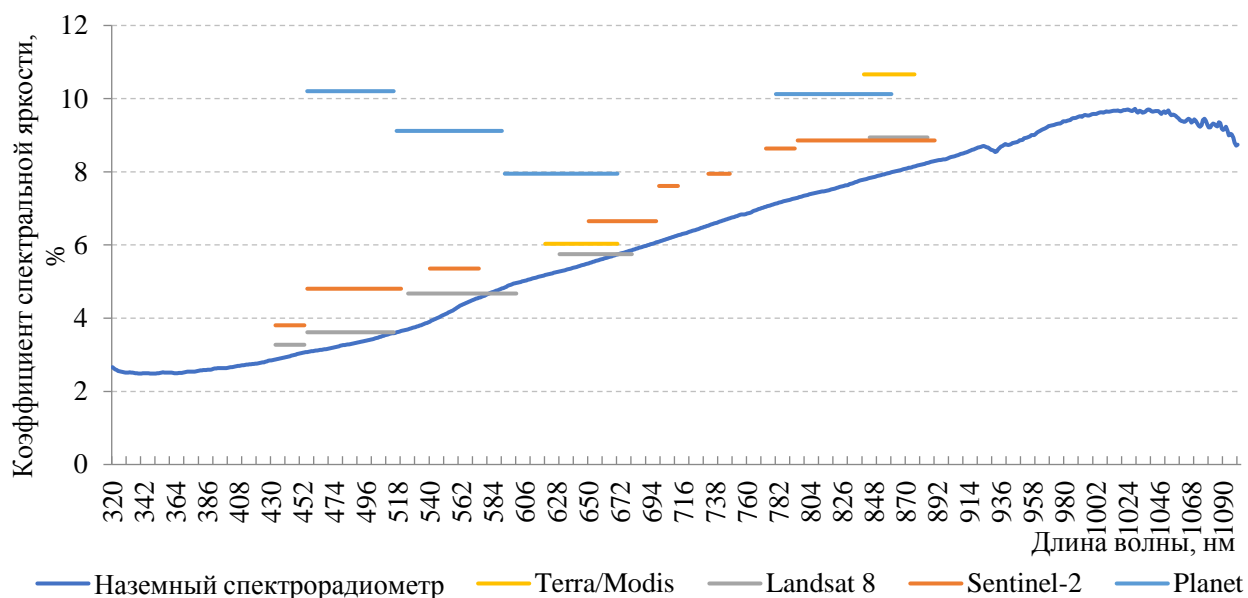


Рисунок 6 – Сравнение диапазонов наземной спектральной съемки с космической

Анализ использования разного набора диапазонов для уравнения показал, что модель строится наилучшим образом при использовании 1, 3, 4 и 5 диапазонов. В табл. 6 приведены данные коэффициентов спектральной яркости для диапазонов лабораторного спектрометра, которые попадают в более широкий диапазон каналов Landsat-8 OLI.

Таблица 6 – Коэффициенты спектральной яркости почв в разных диапазонах лабораторного спектрометра (диапазон выбран согласно каналам Landsat-8 OLI)

Номер опыта	433-453 нм (1 канал)	450–515 нм (2 канал)	525–600 нм (3 канал)	630–680 нм (4 канал)	845–885 нм (5 канал)
1	11,92	13,67	19,20	24,36	26,23
2	15,58	18,78	29,18	37,85	42,88
3	11,62	13,61	20,93	30,12	34,63
4	11,61	13,35	20,34	29,00	32,52
5	2,56	2,79	3,61	4,80	8,17
6	12,37	14,23	19,75	25,96	28,24
7	7,42	8,31	11,03	14,01	16,85
8	6,61	7,27	9,41	11,69	14,80
9	14,80	17,55	25,06	30,47	36,43
10	11,90	13,90	18,17	20,80	25,98
11	6,61	7,62	10,25	12,67	17,06
12	12,59	14,53	21,20	29,02	32,98
13	9,00	10,23	14,69	19,96	23,93
14	6,07	6,84	9,32	12,06	15,47
15	9,74	11,21	16,31	22,00	26,08
16	9,53	11,00	15,66	20,35	24,91
17	7,34	8,32	11,26	14,31	18,78

4.2 Наземные и спутниковые спектры

Во время исследования на паровом поле Менино, параллельно с отбором образцов почв, производилась съемка спектра отражения каждой точки отбора образцов полевым спектрометриком для верификации спутниковой информации. Расстояние между точками составляло примерно 50 шагов (~30-35

м). В результате измерений было получено 108 спектров по которым была проведена вся аналитическая работа.

Наземные спектральные данные сравнивались со спутниковой информацией (рис. 6).

Из данных спектрометра выделялись диапазоны, соответствующие каналам спутников. При помощи статистических показателей выбрали те каналы, которые имели наибольший вклад в регрессию (табл. 5).

Таблица 7 – Каналы спутников, используемые в качестве параметров модели регрессии

Приборы ДЗЗ	Каналы
Modis/Terra	1, 2
Landsat-8 OLI	1, 4, 6, 7
Sentinel-2	1, 4, 6, 8a
Planet	1, 2, 3, 4

Спутниковая информация подбиралась максимально синхронно к дате наземных измерений. Наиболее приближенные данные к дате полевых исследований для Terra/Modis являлся восьмидневный композит от 5 августа 2018 года, для Landsat-8 OLI – сцена от 10 августа, для Sentinel-2 – гранула от 19 августа, для Planet – сцена от 8 августа.

5 Регрессионный анализ данных

Спектральные данные спутниковых изображений извлекались при помощи приложения ArcMap. В последствии, в программе MS Excel происходило построение моделей регрессии. В зависимости от количества входных каналов и индексов уравнение имело различное количество параметров.

5.1 Лабораторные спектры

Для построения модели регрессии по данным лабораторной спектрометрии использовались диапазоны, соответствующие каналам Landsat-8 OLI. В качестве компонента почвы выбрано содержание гумуса. По результатам регрессионного анализа получено следующее уравнение:

$$G=7,39-0,81\times X_1+0,61\times X_2-0,65\times X_3-0,29\times X_4 \quad (3)$$

Множественный коэффициент детерминации данной модели равнялся 0,78. Точность определения содержания гумуса в образцах (RMSE) составила $\pm 1,06\%$.

Используя данное уравнение, в ArcMap при помощи инструмента «Алгебра карт» был построен новый растр, в каждом пикселе которого значения содержания гумуса.

5.2 Наземные и космические спектры

Для построения моделей регрессии по спутниковым данным в приложении ArcMap при помощи инструмента «Извлечение» извлекались спектральные данные только тех пикселей, в которых находились точки отбора почвы. Для каждого спутника входные каналы были различны (табл. 5).

Уравнение регрессии по данным Terra/Modis строилось по трем параметрам – 1 и 2 канал, а также посчитанный при помощи этих каналов индекс NDVI для неаналитической маски. Так как пространственное разрешение данного спутника слишком большое для данных исследований (250 м), было выбрано 3 наиболее подходящих пиксела. Уравнение регрессии имело вид:

$$G = 9,87 - 1,15 \times X_1 + 0,02 \times X_2 \quad (4)$$

Множественный коэффициент детерминации данной модели составил 0,2. RMSE равнялось $\pm 0,71\%$.

По результатам регрессионного анализа по спутниковым данным Landsat-8 OLI получено следующее уравнение:

$$G = 12,19 - 4,18 \times X_1 - 1,93 \times X_2 - 0,86 \times X_3 + 2 \times X_4 \quad (5)$$

Множественный коэффициент детерминации данной модели равнялся 0,31. RMSE составила $\pm 0,71\%$.

Уравнение регрессии по данным Sentinel-2 строилось по 4 каналам, а индекс NDVI для неаналитической маски подсчитывался по каналам 8 и 4 каналам. Уравнение регрессии имело вид:

$$G = 3,98 + 0,67 \times X_1 - 0,72 \times X_2 - 0,75 \times X_3 + 0,77 \times X_4 \quad (6)$$

Множественный коэффициент детерминации данной модели являлся 0,38. RMSE составила $\pm 0,68\%$.

Для построения регрессионной модели по спутниковым данным Planet использовались все имеющиеся каналы. Индекс NDVI подсчитывался по 4 и 3 каналам. Полученное уравнение регрессии имело вид:

$$G = 8,86 + 0,88 \times X_1 - 0,97 \times X_2 - 1,24 \times X_3 + 0,38 \times X_4 \quad (7)$$

Множественный коэффициент детерминации данной модели составил 0,45. RMSE составила $\pm 0,64\%$.

6 Карты, иллюстрирующие результаты регрессионного анализа

По результатам расчетов уравнений регрессии в Excel получены параметры, которые применялись во время построения карт содержания компонентов почв. При помощи инструмента «Калькулятор растра» в ArcMap полученные параметры умножались на каналы спутниковых изображений.

6.1 Карта полей по лабораторным данным

Для построения карты содержания гумуса в почве по данным лабораторных спектрометрических измерений применялось уравнение 3. Результат моделирования гумуса на рисунке 7.

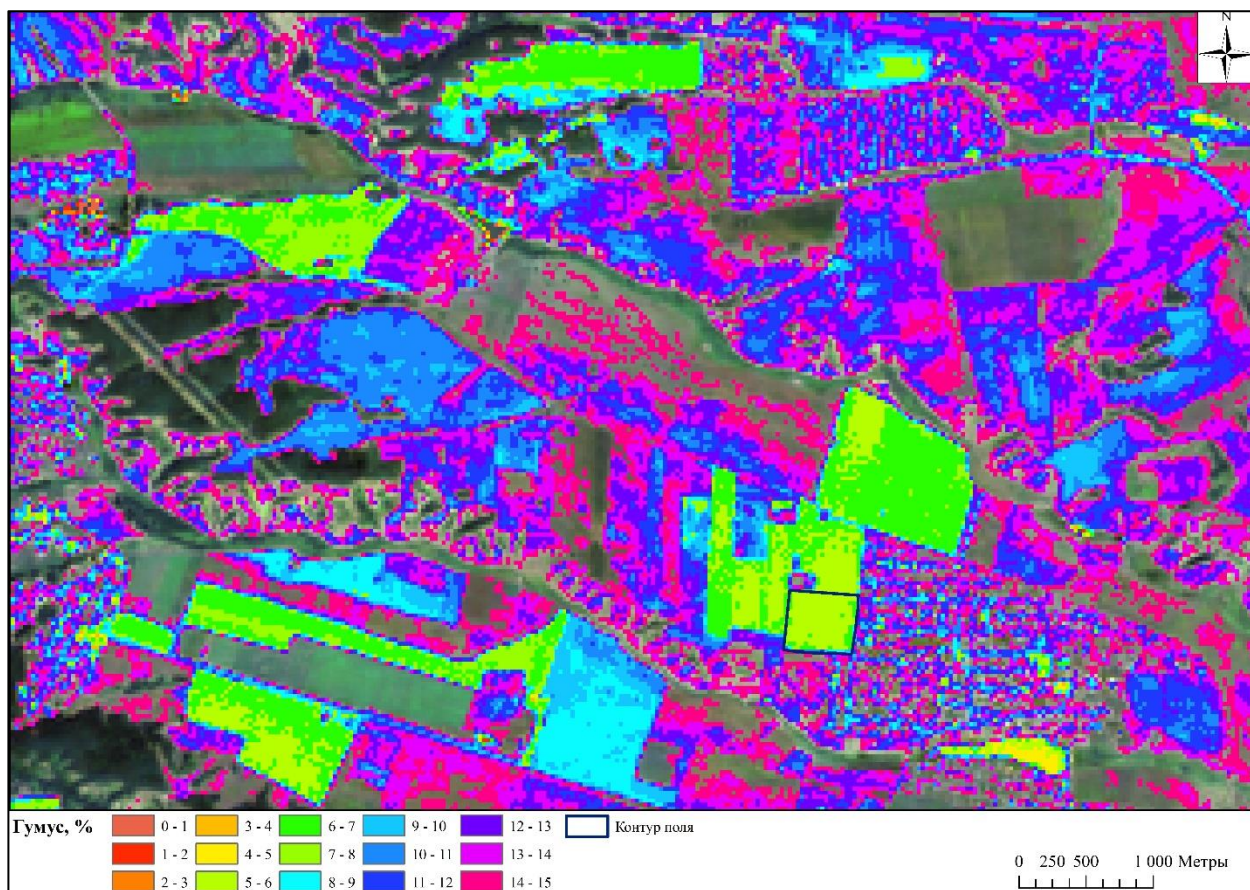


Рисунок 7 – Содержание гумуса в почве полей ОПХ «Минино» по данным лабораторного спектрометра

Шкала градации гумуса выбрана от 0 до 15% с шагом в 1%. При использовании данной шкалы выделились сельскохозяйственные поля. Отчетливо видны различия по содержанию гумуса в пределах одного поля. Но также, данная модель рассчитывает значение гумуса для некоторых участков с растительностью.

6.2 Карты полей по полевым данным

6.2.1 Регрессионная модель для полей ОПХ «Минино»

Для построения карт содержания гумуса в почве использовались параметры уравнений 4-7, рассчитанные по данным каналов спутниковых

изображений. Карты моделирования содержания гумуса наилучшим образом построились по данным более высоко пространственного разрешение (рис. 8-11).

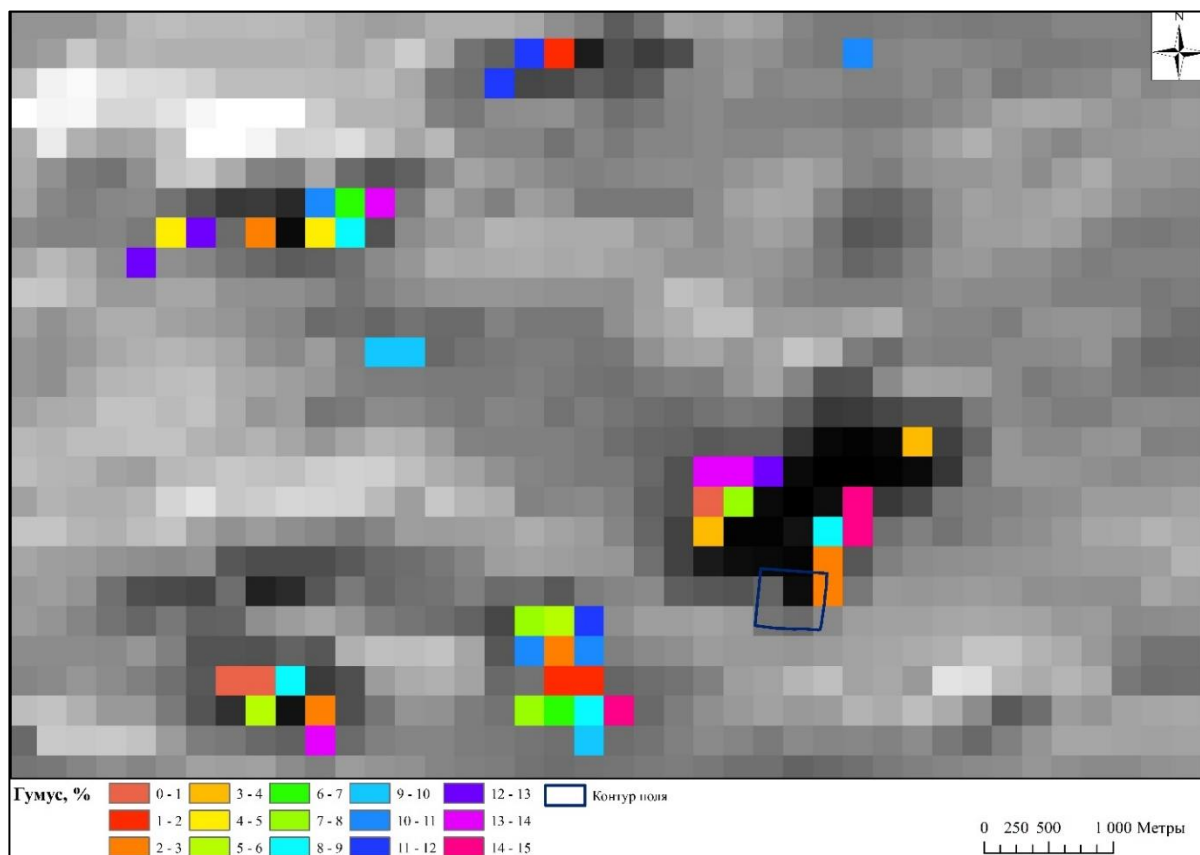


Рисунок 8 – Содержание гумуса в почве полей ОПХ «Минино» по данным Terra/Modis

На рисунке 6 выделились лишь большие поля, размер которых превышал пространственное разрешение данных спутника. Очевидно, что для построения модели регрессии небольших полей, характерных для центральных районов края, данные со спутника Terra/Modis не подходят.

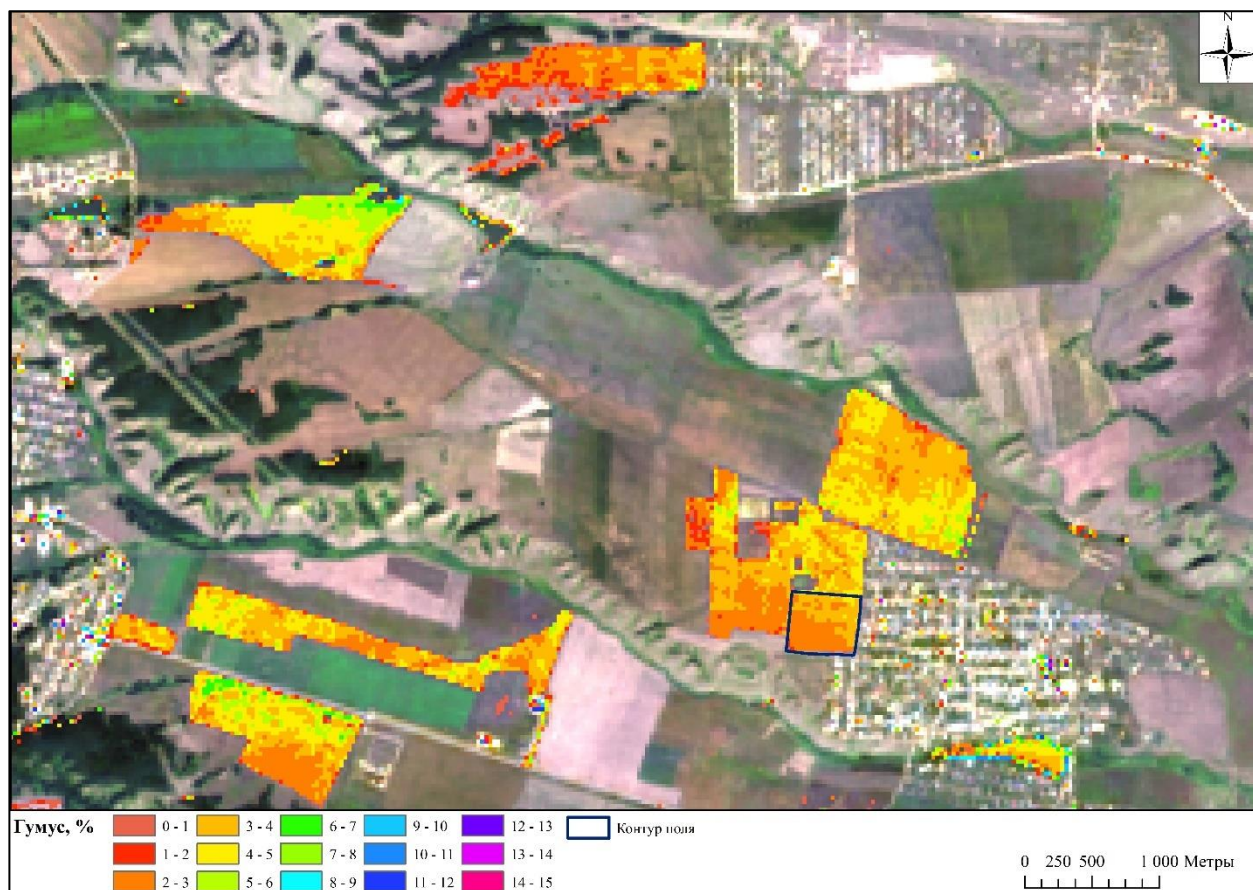


Рисунок 9 – Содержание гумуса в почве полей ОПХ «Минино» по данным Landsat-8 OLI

Модель содержания гумуса по данным Landsat-8 OLI построилась на открытых почвах. В пределах одного поля можно различить общие тенденции по содержанию гумуса. На исследуемом поле четко различима граница по диагонали: на юго-западной стороне процент содержания гумуса варьируется в пределах от 2 до 3, на северо-восточной стороне – от 3 до 4 и местами от 4 до 5.

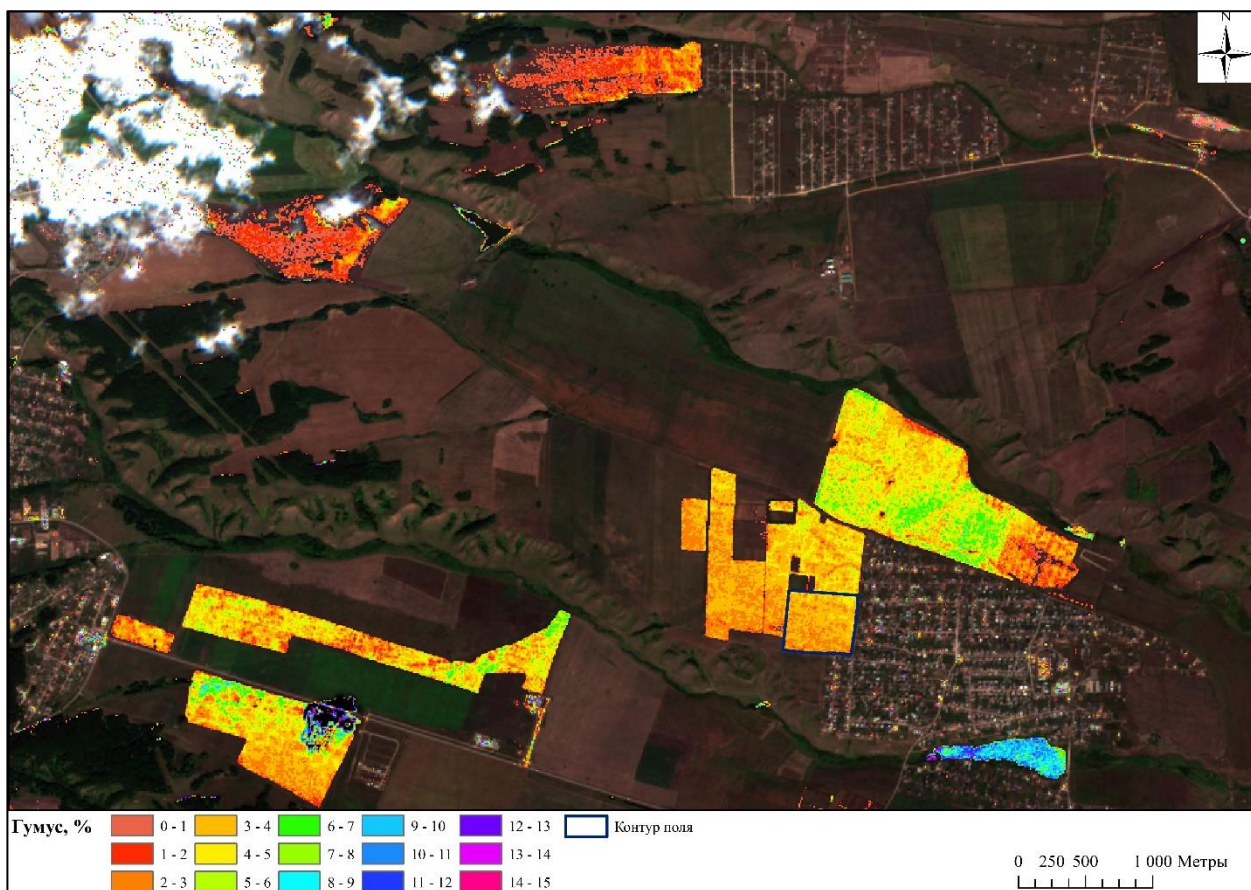


Рисунок 10 – Содержание гумуса в почве полей ОПХ «Минино» по данным Sentinel-2

По данным Sentinel-2 модель хорошо сработала на открытых почвах. Поля с растительностью не вошли в заданную шкалу от 0 до 15%. Отчетливо видны различия содержания гумуса в пределах одного поля.

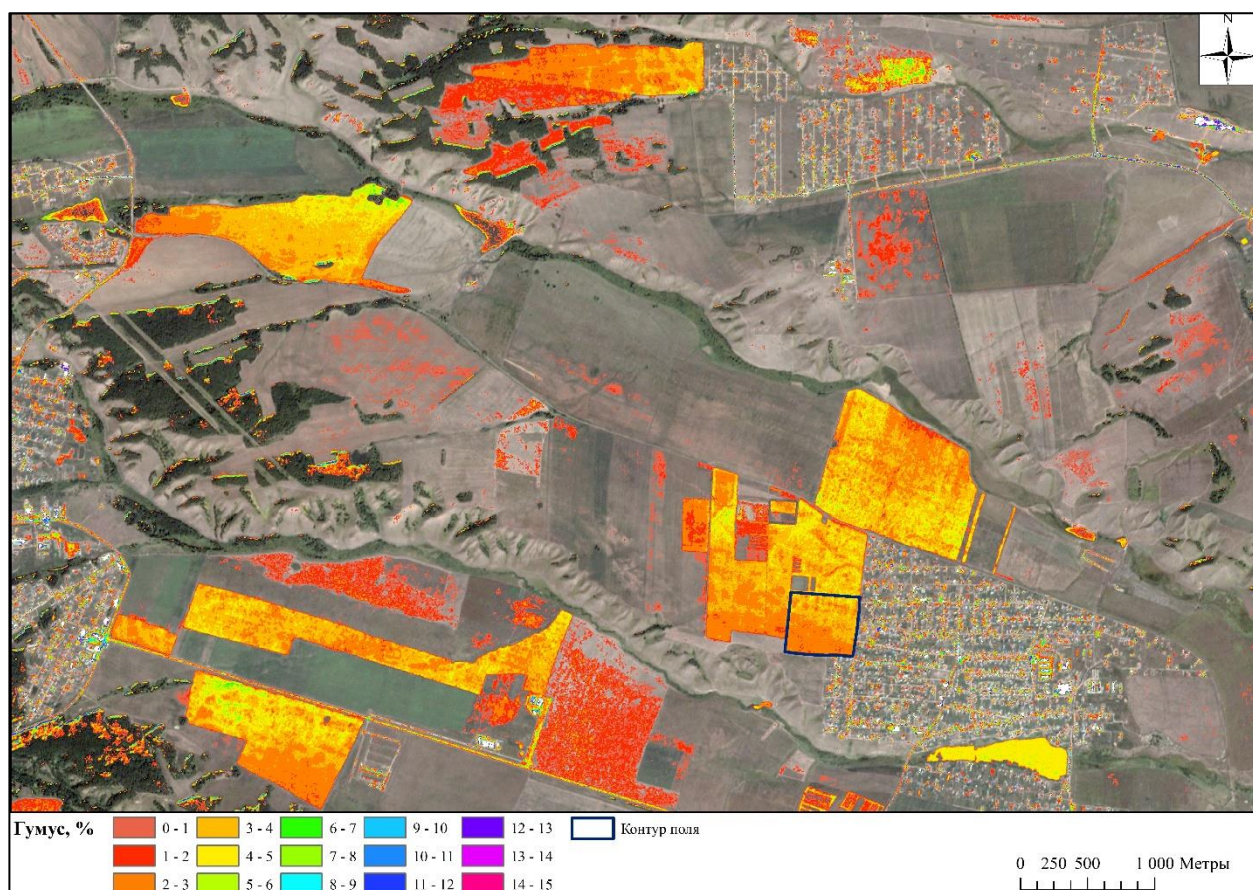


Рисунок 11 – Содержание гумуса в почве полей ОПХ «Минино» по данным Planet

По данным Planet также хорошо сработала модель на открытых почвах, как и по данным Sentinel-2. Но данная модель также распространилась и на некоторые участки с растительностью. Это может быть связано с лучшим пространственным разрешением.

Крупномасштабный анализ пространственной изменчивости и моделирование поверхностных свойств почвы возможен с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования, так как большинство из этих свойств почвы, например, гранулометрический состав и содержание гумуса, прямо или косвенно влияют на отражательную способность почвы. Спектральные данные отражательной способности могут быть альтернативой традиционным способам для определения свойств почвы.

6.2.2 Регрессионная модель для полей учхоза «Миндерлинское»

Для проверки регрессионной модели к спутниковым данным на территорию учхоза «Миндерлинское» применились параметры уравнения, построенные по данным ОПХ «Минино». Так как наиболее точная модель строится по данным Planet, для моделирования содержания гумуса в почве использовались параметры уравнения 6. Данные спутника взяты за ту же дату, что для ОПХ «Минино». Результат моделирования представлен на рисунке 12.

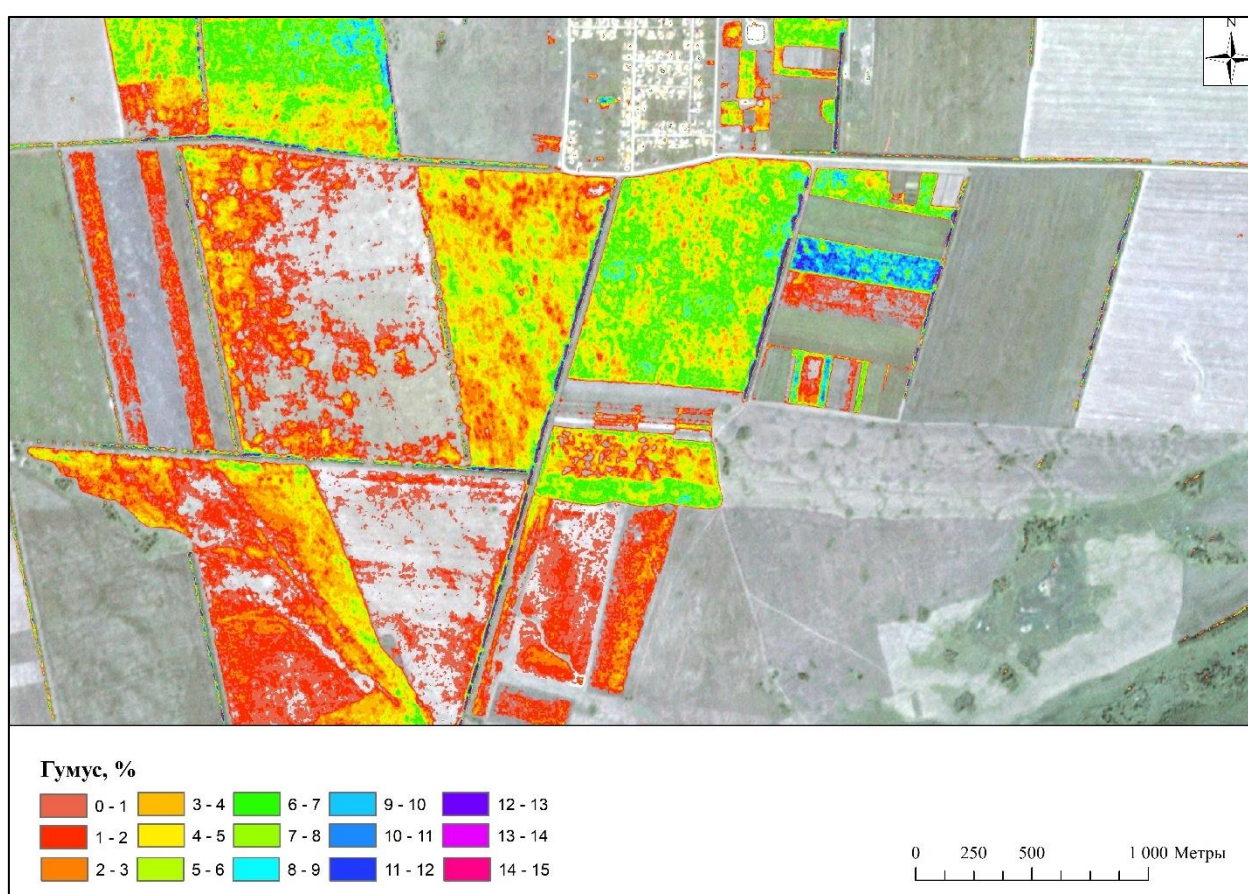


Рисунок 12 – Содержание гумуса в почве полей учхоза «Миндерлинское» по данным Planet (в качестве входных данных по содержанию гумуса использовались данные с ОПХ «Минино»)

В диапазон от 0 до 15% попали пиксели с открытыми почвами. Также модель применялась на некоторые территории с растительностью.

Для проверки результаты моделирования сравнивались с фактическими значениями гумуса, предоставленными сотрудниками Красноярского Аграрного Университета. На некоторых полях в 30 точках были отобраны образцы почвы и проанализированы. Сравнивались только те точки отбора образцов, которые не были закрыты растительность.

Некоторые смоделированные значения были близки к реальным значениям, а другие, наоборот, сильно отличались (табл. 6).

Таблица 6 – Фактические и смоделированные значения гумуса, %

Номер точки	Фактическое значение гумуса	Смоделированное значение гумуса
1	7,38	6,21
2	5,76	3,11
3	7,26	2,98
4	7,00	3,77
5	5,38	3,83
6	5,03	5,85
7	7,58	7,74
8	6,26	5,98
9	8,87	5,63
10	3,32	3,28

Точность модели на данном хозяйстве составила $\pm 1,84\%$, а множественный коэффициент детерминации – 0,18. По полученным статистическим характеристикам можно сделать вывод, что параметры уравнения регрессии, полученные в результате расчетов на территорию ОПХ «Минино» не подходят для моделирования содержания гумуса на территорию ООО учхоз «Миндерлинское».

6.2.3 Создание ГИС при помощи регрессии по данным учхоза «Миндерлинское»

На полях данного учхоза с поверхности почвы проведен отбор 30 образцов для агрохимического анализа (гумус, pH_{H_2O} , физическая глина). Выбор спутниковой информации основался на нескольких факторах: отсутствие облаков, наименьшее количество растительного покрова. Наиболее подходящая спутниковая информация получена от 29 сентября 2018 года.

Выбранный снимок содержит большое количество пикселей с открытыми почвами, но также нем присутствуют растительный покров и наземные объекты (населенные пункты, дороги). Данные от таких элементов могут давать смешанные результаты. При помощи неаналитической маски такие данные не участвовали при моделировании.

Расчет и построение регрессионных моделей с использованием данных космической съемки и агрохимического анализа происходил в MS Excel. Для моделирования содержания гумуса в почве использовалась уравнение 1.

В таблице 7 представлены уравнения множественной линейной регрессии для каждого компонента почвы, а также статистические показатели: множественный коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратичная ошибка (RMSE).

Таблица 7 – Уравнения множественной линейной регрессии для моделирования содержания агрохимических компонентов почвы

Компонент почвы	Уравнение	R^2	RMSE
Гумус, %	$63,8-7,8*X_1+4,8*X_2-1,1*X_3-0,9*X_4$	0,63	1,1
Физическая глина, %	$156,2-16,4*X_1+7,8*X_2+3,9*X_3-1,7*X_4$	0,5	1,93
pH_{H_2O}	$6,6-1,4*X_1+3,8*X_2-1,6*X_3-0,8*X_4$	0,17	0,5

Наиболее высокий R^2 наблюдается при моделировании содержания гумуса.

Полученные уравнения регрессии использованы для пространственного моделирования данных компонентов почвы. В результате получены слои пространственного распределения гумуса, физической глины и pH_{H_2O} . На рисунках 13-15 показано пространственное распределение содержания исследуемых компонентов почвы.

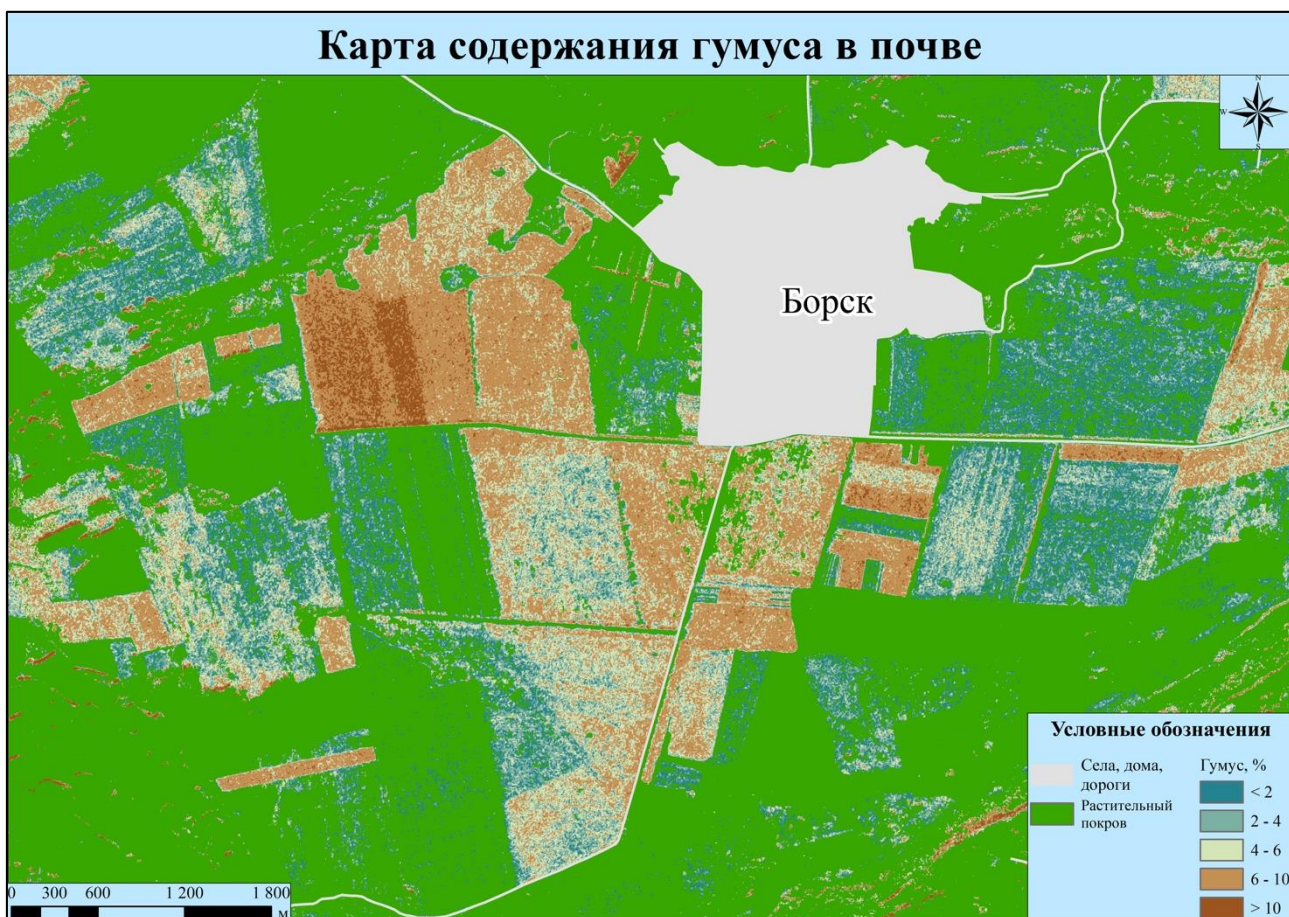


Рисунок 13 – Пространственное распределение содержания гумуса в почве



Рисунок 13 – Пространственное распределение содержания физической глины в почве



Рисунок 13 – Пространственное распределение содержания pH_{H_2O} в почве

Проведенный анализ показал, что содержание гумуса, наблюдаемого в исследуемом районе, варьировалось от 0 до 10 процентов, физической глины от 45 до 80 процента, pH_{H_2O} от 3 до 8.

Использование представленной методики и сохранение результатов моделирования в виде слоев ГИС дает возможность моделировать содержание агрохимических показателей в пахотном слое почвы, что позволит снизить количество агрохимических анализов. Для точности модели необходимо высокое пространственное разрешение спутниковой информации. Полученная модель может использоваться для выравнивания плодородия почвы в конкретных условиях путем дифференцированного внесения органических удобрений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании проведено измерение спектров отражения почвенных образцов в лабораторных и полевых условиях. При лабораторной спектрометрии получены спектры отражения 17 образцов почв с разными агрохимическими показателями, отобранных в четырех точках земледельческой зоны в окрестностях г. Красноярск. Метод многомерной линейной регрессии был принят для изучения взаимосвязи между поверхностными свойствами почвы и отражательной способностью почвы, в результате чего выявлено, что содержание гумуса в почве моделируется наиболее точным образом. Параметры уравнения применялись при построении карты содержания гумуса на данных Landsat-8 OLI. Спектры отражения почв, полученные в ходе полевых исследований, использовались для верификации спутниковой информации.

Проведен анализ информации, полученной от спутниковых спектрорадиометров, имеющих разное пространственное и временное разрешение, а также спектральные диапазоны съемки. Для этого проводился регрессионный анализ по данным ОПХ «Минино». Наиболее точные модели содержания почвенных компонентов строились по данным с высоким пространственным разрешением.

Для определения границ применимости регрессионных моделей в разных условиях, полученные параметры уравнения по данным ОПХ «Минино» использовались для моделирования содержания гумуса в рамках земель учхоза «Миндерлинское». Полученная карта отражает существующее пространственное распределение содержания гумуса. При этом, R^2 построенной модели составляет 0,18.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов, Б. В. Дистанционная индикация содержания гумуса в почве / Б. В. Виноградов // Почвоведение. – 1981. – №11. – С. 114–123.
2. Геннадиев, А. Н. География почв с основами почвоведения : учеб. для вузов по геогр. специальностям / А. Н. Геннадиев, М. А. Глазовская. – Москва : Высшая Школа, 2005. – 461 с.
3. ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества. – Введ. 01.07.1993. – Москва : Издательство стандартов.
4. ГОСТ 26204-91 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. – Введ. 01.03.1993. – Москва : Издательство стандартов.
5. ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО. – Введ. 01.07.1986. – Москва : Издательство стандартов.
6. ГОСТ 26951-86 Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом. – Введ. 01.07.1992. – Москва : Издательство стандартов.
7. Заварзина, А. Г. - Содержание гумуса и отражательная способность верхних горизонтов почв юга Европейской части России / А. Г. Заварзина, М. С. Розанова, Н. И. Суханова // Почвоведение. – 1995. – №10. – С. 1248–1255.
8. Качинский, Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения : монография / Н. А. Качинский. – Москва : Изд-во АН СССР, 1953. – 193 с.
9. Кравцов, С. Л., Оценка концентрации органических веществ в почве методом дистанционного зондирования Земли / С. Л. Кравцов, Л. В. Орешкина // Информатика. – 2009. – Т. 24, №4. – С. 124–133.
10. Кротов, Д. Г. Связь между содержанием гумуса в пахотном горизонте серой лесной почвы и яркостью в красном канале спутникового изображения / Д. Г. Кротков, В. П. Самсонова, Е. А. Кротова, Е. Ю. Лавринова // Агрехимический вестник. – 2017. – № 1. – С. 11–14.

11. Крупкин, П. И. Черноземы Красноярского края : монография / П. И. Крупкин. – Красноярск : Крас-ГУ, 2002. – 332 с.
12. Лабутина, И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учебное пособие для студентов вузов / И. А. Лабутина. – Москва: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.
13. Малышевский, В. А. Расчет содержания гумуса с использованием данных дистанционного зондирования земли / В. А. Малышевский, Ю. П. Федулов, Н. В. Островский, И. А. Лебедевский // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 92. – С. 859–883.
14. Мамаев, А. Т. Биофизические методы в исследованиях почв Дагестана / А. Т. Мамаев, М. Ю. Алиева, М. Х. М. Магомедова, Е. В. Пиняскина, А. В. Пиняскина // Вестник Дагестанского научного центра РАН. – 2017. – № 64. С. 6–10.
15. Михайленко, И.М., Управление сроками сева по данным дистанционного зондирования Земли / И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 5. – С. 149–160.
16. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации : монография / Д. С. Орлов. – Москва : МГУ, 1990. – 325 с.
17. Орлов, Д. С. Цвет и диагностика почв / Д. С. Орлов // Соровский образовательный журнал. – 1997. – Т. 3, №4. – 45 с.
18. Савин, И. Ю. Автоматизированная инвентаризация почв на основе материалов дистанционных съемок: возможности и перспективы / И. Ю. Савин // Региональные проблемы экологии, географии и картографии почв. – 1998. – С. 91–101.
19. Сергеев, Г.М. Островные лесостепи и подтайга Приенисейской Сибири : монография / Г.М. Сергеев. – Иркутск : Восточно-Сибирское книжное издательство, 1971. – 262 с.
20. Украинский, П. А. Изучение гранулометрического состава почв Поосколья по данным дешифрирования космических снимков / П. А.

Украинский, О. А. Чепелев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 1-5. – С. 1225–1229.

21. Устройство и характеристики спутника Landsat 8 : тех. информация [сайт]. 2013. – Режим доступа: <https://www.nasa.gov/content/landsat-8-instruments>.

22. Устройство и характеристики сенсора Modis : тех. информация [сайт]. 1999. – Режим доступа: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/index.php>.

23. Устройство и характеристики спутника Sentinel-2 : тех. информация [сайт]. 2015. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2>.

24. Халфин, А. А. Статистический анализ данных: монография / А. А. Халфин. – Москва : ООО Бином-Пресс, 2008. – 512 с.

25. Чупрова, В. В. Оценка плодородия почв и почвенных комбинаций пахотных земель Красноярской лесостепи / В. В. Чупрова, Т. Н. Демьяненко, З. С. Жуков, Ю. В. Бабиченко // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – Т. 55, №2. – С. 47–56.

26. Шевырногов, А.П., Идентификация чистого пара по наземным спектрометрическим и спутниковым данным / А. П. Шевырногов, А.А. Ларько, И. Ю. Ботвич, Д. В. Емельянов, Т. И. Письман // Вестник КрасГАУ. – 2019. – Т. 144, № 3. – С. 9–15.

27. Ahmed, Z. Evaluation of Landsat TM5 Multispectral Data for Automated Mapping of Surface Soil Texture and Organic Matter in GIS / Z. Ahmed, I. Javed // European Journal of Remote Sensing. – 2014. – No 47. – pp. 557–573.

28. Bui, E. N. Knowledge discovery from models of soil properties developed through data mining / E. N. Bui, B. L. Henderson, K. Viergever // Ecological Modelling. – 2006. – Vol. 191, No 3. – pp. 431–446.

29. Jordan, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor / C. F. Jordan // Ecology. – 1969. – Vol. 50. – pp. 663–666.

30. Karaburun A. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed / A. Karaburun // Ozean Journal of Applied Sciences. – 2010. – Vol. 3, № 1. – P. 77–85.

31. The Land Processes Distributed Active Archive Centre [Электронный ресурс] : электронный архив по предоставлению данных с космических спутников. – Режим доступа : <https://lpdaac.usgs.gov/>.
32. Planet Application Program Interface: In Space for life on Earth : программный интерфейс по работе с данными Planet [сайт]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.planet.com/>.
33. Rogge, D. Building an exposed soil composite processor (SCMaP) for mapping spatial and temporal characteristics of soils with Landsat imagery (1984–2014) / D. Rogge, A. Bauer, J. Zeidler, A. Mueller, T. Esch, U. Heiden // Remote Sensing of Environment. – 2018. – No 205. – pp. 1–17.
34. U.S. Geological Survey [Электронный ресурс] : электронный архив по предоставлению данных с космических спутников. – Режим доступа: <https://www.usgs.gov/>.
35. Yongcheng, J. Analysis of Manganese in soil using laser-induced breakdown spectroscopy / J. Yongcheng, H. Jiang, J. Benchi, L. Dong // Journal of Applied Spectroscopy. – 2017. – Vol. 84, No 1. – pp. 120–126.