

Решение прикладной научной задачи заключается в получении объективной оценки состояния земель сельскохозяйственного назначения и ООПТ, обеспечивающие снижение экологической нагрузки в сельском хозяйстве, повышение эффективности использования природных ресурсов и их экологической устойчивости, формируя основы ESG-стратегии (экологическое, социальное и корпоративное управление). Комплексный подход к решению проблемы реализован методами геоинформационного и Веб-картографирования, статистической обработки пространственно-распределенных данных.

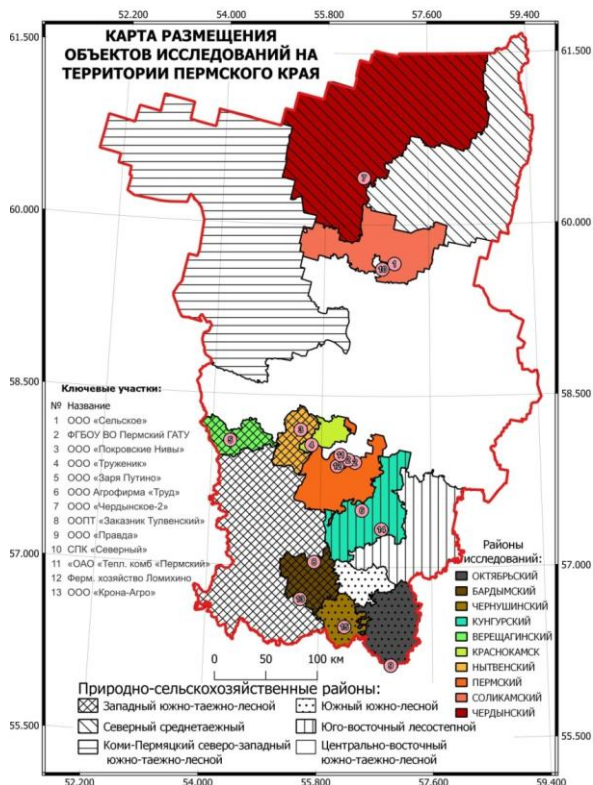


Рис. 1. Карта размещения объектов исследования на территории Пермского края

Картографическая модель почвенного покрова доступна широкому кругу пользователей и может быть использована при освоении региона, организации мероприятий рационального использования почв, по охране окружающей среды, заповедных территорий и зонирования ООПТ, проектирования туристических маршрутов и объектов инфраструктуры, создания и ведения экологических баз данных, моделирования и прогнозирования экологических ситуаций.

Объекты исследования – агроландшафты, почвенный покров и свойства почв Пермского края в разных физико-географических условиях региона (рис. 1).

*Оценка возможности использования инновационных научных подходов цифрового почвенного картографирования сельскохозяйственных землепользований региона, путем экстраполяции результатов обработки цифровой модели рельефа (ЦМР)*

Экстраполяция данных крупномасштабной почвенной съемки с имеющейся почвенной карты по формам рельефа (рис. 2) позволила выделить в структуре почвенного покрова на территории, не имеющей почвенного обследования (на примере ключевого участка № 1), 10 почвенных картографических единиц (рис. 3).



Рис. 2. Результат классификации рельефа области исследований по методу SAGA TPI Based Landform Classification на участок, имеющий покрытие крупномасштабной почвенной картой (ПХ «Восход») и участок исследований (ООО «Сельское»)



Рис. 3. Почвенная карта ключевого участка № 1 (ООО «Сельское»)

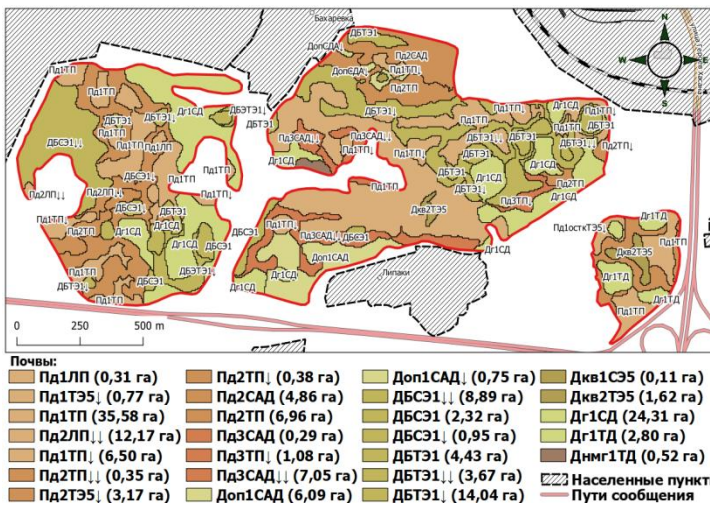


Рис. 4. Почвенная карта земельных участков ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ

Экспликация карты земельных участков (на примере ключевого участка № 2) отражает взаимосвязь почв с элементами рельефа (рис. 4). Применение в крупномасштабном картографировании современных методов обработки цифровой модели рельефа позволяет эффективно в камеральных условиях выполнить прогнозную почвенную карту.

*Оценка возможности пространственного моделирования различных свойств почв по показателям ЦМР на основе БПЛА-съёмки с использованием геостатистического и регрессионного методов*

Проведено моделирование агрохимических свойств в почвах агропредприятий на площади более 1000 га. Исследование совокупности данных по содержанию

гумуса позволило подобрать оптимальные параметры создания геостатистического растра методом «обычный кригинг» (рис. 5).

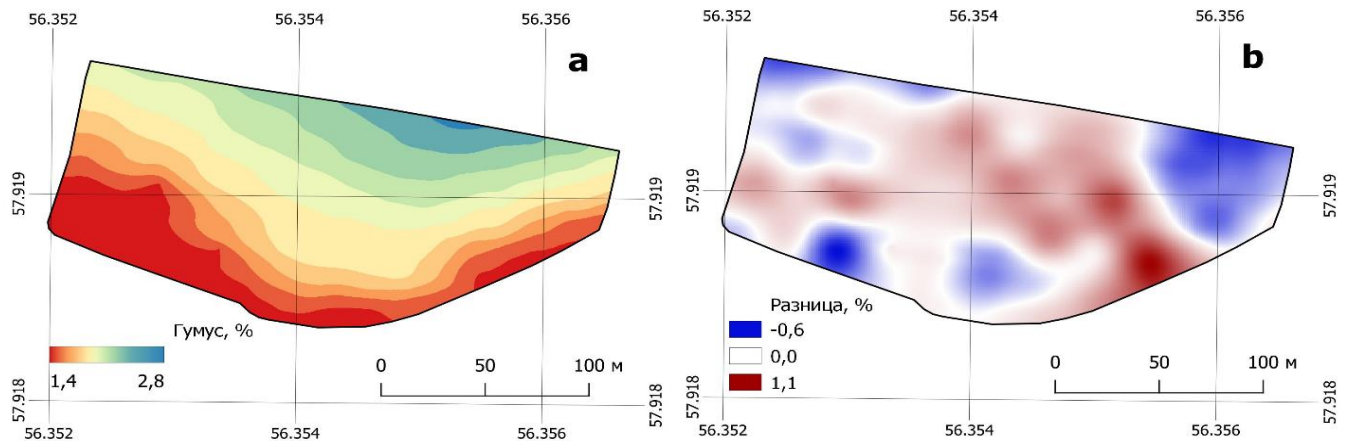


Рис. 5. Пространственное отображение результатов моделирования содержания гумуса в дерново-подзолистых почвах: а – смоделированная поверхность содержания гумуса; б – относительная разница с кригинг-интерполяцией

Установлена взаимосвязь пространственного изменения содержания гумуса от высоты, расстояния до водотоков и относительного положения склонов с помощью коэффициентов корреляции растров инструментом Scatterplot программы SAGA (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием гумуса в почвах и морфометрическими показателями рельефа

1	2	3	4	5	6	7	8
0,75	0,66	0,75	-0,48	0,14	0,28	0,17	0,14

Примечание. 1 – высота, м; 2 – относительное положение склонов; 3 – расстояние до водотоков, м; 4 – глубина долины; 5 – уклон; 6 – эрозионный потенциал рельефа; 7 – топографический индекс влажности; 8 – плановая кривизна.

Полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$\text{Гумус, \%} = -20,39 + 0,15 \times \text{ELEV} + 0,26 \times \text{CND} - 0,28 \times \text{RSP}, (R^2=0,58)$$

где ELEV – высота, м; CND – Channel Network Distance; RSP – Relative Slope Position

Физическими механизмами накопления (или потери) гумуса тестового участка являются факторы эрозионного потенциала, снижающие экологическую устойчивость. Моделирование рельефа на основе высокодетальных БПЛА-снимков позволило установить влияние геоморфологических условий на содержание гумуса и смоделировать его пространственное распределение для конкретных условий съёмки, в частности, для территорий с выраженным эрозионным потенциалом.



Анализ пространственной изменчивости агрохимических свойств почв в пределах единичного сельскохозяйственного угодья проведен с помощью геостатистических методов математико-картографического моделирования (рис. 6).

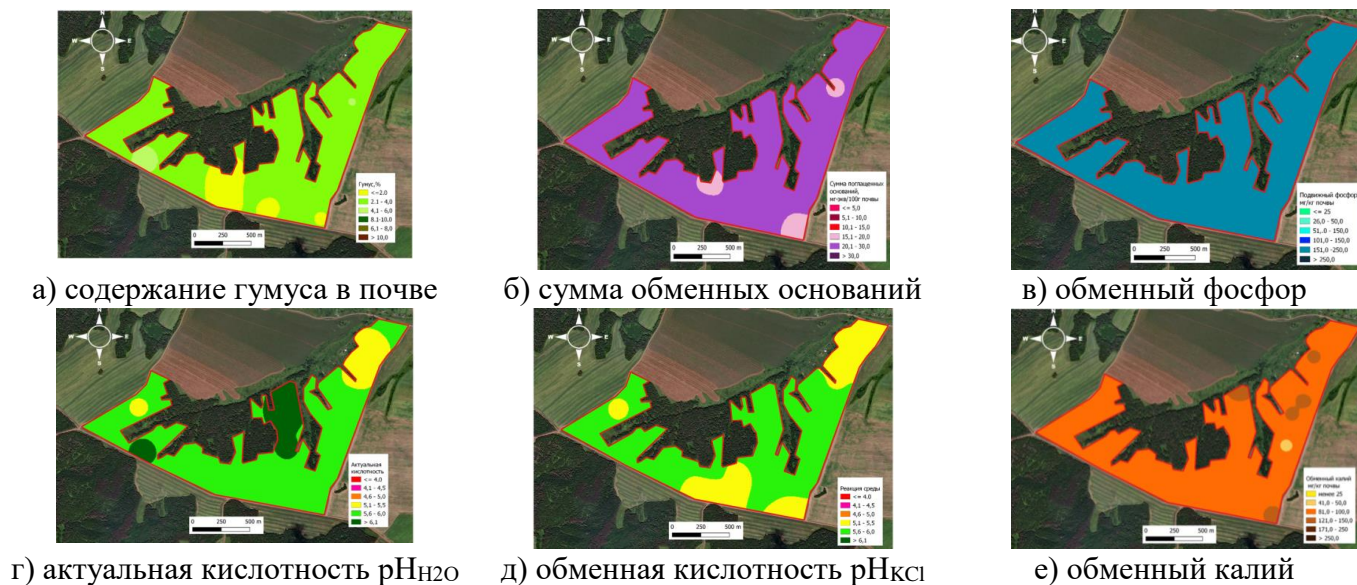


Рис. 6. Картограммы агрохимических свойств агро-светло-серой почвы

Для конкретного сельскохозяйственного угодья рекомендовано внесение органических удобрений в дозе 90 т/га для выравнивания плодородия и обеспечения бездефицитного баланса гумуса, известкование поддерживающее в дозе 2-4 т/га на отдельных участках. Созданные агрохимические картограммы, основанные на геостатистических поверхностях, могут быть использованы в системе точного земледелия для локального внесения извести и удобрений, что способствует рациональному и эффективному использованию почв и экономии финансовой составляющей сельхозпроизводителя.

*Определение эрозионно-опасных участков в условиях эрозионно-аккумулятивного рельефа региона и прогнозирование эрозионных потерь почв, используя глобальную цифровую модель рельефа и модели высот по данным БПЛА-съемки*

Моделирование эрозии почв проведено по картам в детальном и крупном масштабе по ЦМР и БПЛА-съемки. Максимальный потенциальный смыв по уравнению модели RUSLE (по ЦМР на примере ключевого участка 1) отмечается ниже перегиба, в контурах дерново-карбонатных почв (рис. 7). Более детальная модель высот получена при помощи съемки с беспилотного летательного аппарата. Крутизна склонов, рассчитанная по данным БПЛА-съемки, характеризуется меньшими углами наклона в западной части поля по сравнению с углами наклона

вычисленными по SRTM. Суммарная площадь замкнутых понижений оказалась ниже в цифровой модели рельефа SRTM.

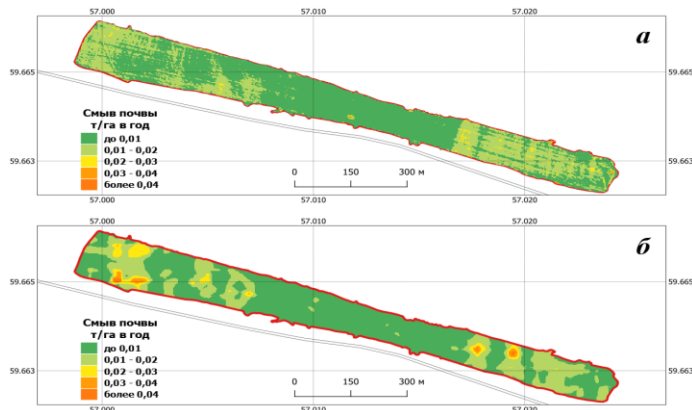


Рис. 7. Карты потенциального смыва почвы по модели RULSE, а – LS-фактор по БПЛА; б – LS-фактор по SRTM

Серия карт морфометрических показателей рельефа по SRTM и БПЛА-съемки демонстрирует графические отличия результирующих растров эрозионных потерь, однако, средние показатели годового смыва почв оказались равны. Цифровая модель высот, полученная с БПЛА, обеспечивает большую детальность рельефа по сравнению с SRTM.

Детальность выделения водотоков является преимуществом БПЛА-съемки. Несмотря на общие сходства контуров, модели эрозионных потерь имеют расхождения по участкам максимумов смыва почвы. Данные БПЛА-съемки являются эффективным средством моделирования эрозионной опасности почв, позволяющие провести исследования в точных границах поля.

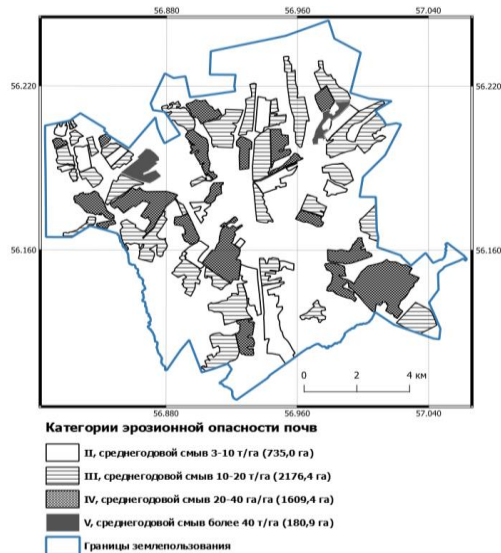


Рис. 8. Картограмма эрозионной опасности почв

Моделирование эрозии почвы в крупном масштабе на основе спутниковых данных и SRTM проведено на площади 13012,9 га (рис. 8). Использованы методы обработки цифровой модели рельефа: перепроецирование в систему координат проекции для территории региона WGS 84/UTM zone 40N, расчет крутизны и линий водотоков. В границах обрабатываемых полей преобладают почвы с предполагаемым среднегодовым смывом от 10 до 20 т/га, а их суммарная площадь равна 2176,4 га или 46% от

всей площади землепользования. Процесс совмещения актуальных границ полей (выделенных по космоснимку) с ЦМР является оперативным средством анализа эрозионной опасности почв. Таким образом, источником данных о природном

факторе эрозии служат цифровые модели рельефа, а антропогенный фактор (сельскохозяйственное использование почв) определяется по космическим снимкам.

Разработанные системы моделирования и прогнозирования эрозионных потерь почв расширяют возможности рационального использования земельных ресурсов сельхозпроизводителями с учетом сохранения плодородия почв, повышения экологической устойчивости агроландшафтов, эффективности использования и получения сельскохозяйственной продукции с минимальными потерями в результате развивающейся эрозии.

*Агроэкологическая оценка адаптивно-сельскохозяйственного потенциала и типизация земель сельскохозяйственного назначения с определением возможности использования земель, совершенствование систем севооборотов и удобрений*

Оценка почв и выделение агроэкологических групп земель на территории хозяйств на ландшафтно-экологической основе с использованием агрохимических данных повышает объективность оценочных работ и определяет ресурсный, производственный потенциал и агроэкологическое состояние почв (рис. 9, 10). Для земель зональной группы характерна мелкоконтурность ареалов и их вытянутые формы, земли эрозионной группы являются фоновыми.

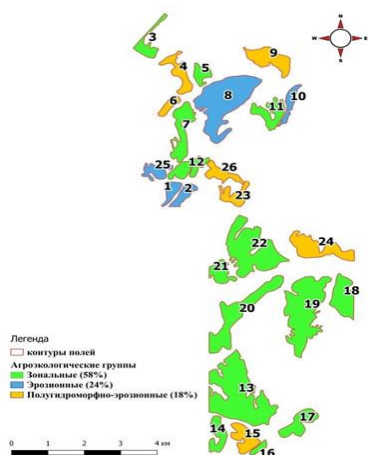


Рис. 9. Карта агроэкологических групп земель ООО «Крона-Агро»

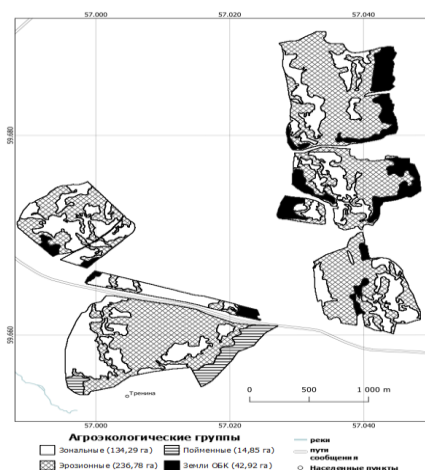


Рис. 10. Карта агроэкологических групп ООО «Сельское»

Агроэкологическая типизация земель позволила адаптировать системы земледелия и удобрений для конкретных почвенно-ландшафтных условий, применить дифференцированную обработку почвы и более гибкую систему севооборотов (табл. 2), что обеспечивает переход на более высокий уровень

агротехнологий, сохранение плодородия почв, устойчивости агроландшафтов и в целом экологической стабильности территории землепользования.

Таблица 2. Системы севооборотов и системы удобрений в севооборотах на основе агроэкологической типизации земель (на примере ООО «Сельское»)

Агрогруппы	Севообороты	Мероприятия	Система удобрений
Зональные	1. Пропашные культуры (свекла + морковь) 2. Яровые зерновые (овес, ячмень) 3. Пропашные культуры (картофель) 4. Яровые зерновые (овес, ячмень) 5. Пропашные культуры (картофель) 6. Яровые зерновые (овес, ячмень)	Органические удобрения в дозе 72-90 т/га (поле № 3), запашка соломы зерновых культур, повышение фосфатного уровня (1,7 т/га* в поле № 6)	Припосевное внесение: зерновые (поля № 2, 4, 6) – P <sub>10-15</sub> ; пропашные (поле № 1 свекла) – (NPK) <sub>10-15</sub> и (NPK) <sub>10</sub> (под морковь), (поля № 3, 5) – (NPK) <sub>20-40</sub>
Эрозионные	1. Яровые зерновые (овес, ячмень) + многолетние травы (клевер, козлятник) 2. Многолетние травы (клевер, козлятник) 3. Многолетние травы (клевер, козлятник) 4. Многолетние травы (козлятник) 5. Многолетние травы (козлятник) 6. Многолетние травы (козлятник)	Запашка отавы и соломы зерновых культур; поддерживающее известкование (2,6-5,2 т/га**)	Припосевное внесение: зерновые (поле № 1) – P <sub>10-15</sub>
Пойменные	Культурные сенокосы	Поддерживающее известкование (2,6-5,2 т/га)	Подкормка N <sub>30-45</sub> на 3-й год пользования трав и в последующие года

\*Фосфоритная мука – ГОСТ 5716-74 (1 сорт); \*\* известняковая мука – ГОСТ 14050-93 (класс 1)

Актуальное состояние почвенного покрова определяется характером землепользования. Проанализировано современное использование мелиорируемых почв и установлены актуальные границы обрабатываемых полей (рис. 11) на основе открытых пространственных данных (Sentinel 2). Агроэкологическая группировка почв выполнена при помощи функции ГИС-анализа «Агрегирование» (рис. 12).

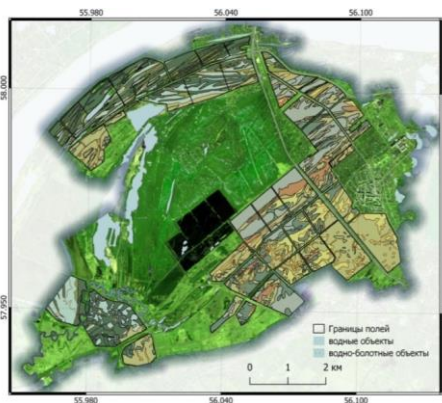


Рис. 11. Карта использования мелиорируемых почв

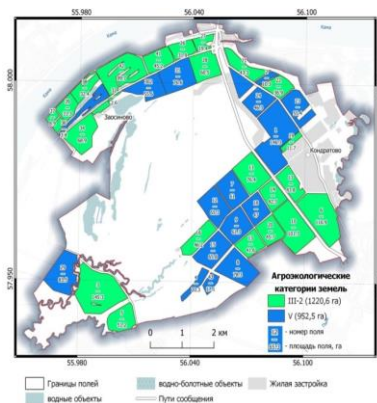


Рис. 12. Карта агроэкологических категорий земель



Выделена агроэкологическая группа «пойменные земли», в составе которой два агроэкологических типа земель, различающихся по степени гидроморфизма. Определены категории земель по способу преодоления ограничивающих факторов. Использование открытых геотехнологий упрощает процесс создания почвенно-картографического Веб-приложения. Доступ к данным по адресу – <https://chascshin.github.io/Kondratovo-GIS/#15/57.9997/56.1137>.

Агроэкологические группы земель в агропредприятиях выделены на основе преобладания факторов, ограничивающих сельскохозяйственное производство в Пермском крае: эрозия; тяжелый гранулометрический состав, и, как следствие, переувлажнение почв; варьирование агрохимических показателей, мелкоконтурность. Внутри групп выделены различные агроэкологические типы земель, которые характерны для каждого хозяйства, что определяет возможности использования типов земель для конкретных почвенно-климатических условий.

*Разработка геоинформационной системы (Веб-ГИС-сервис) пространственного анализа состояния и использования мелиорируемых земель Пермского края*

В результате анализа имеющегося набора данных и оценки функциональных возможностей геотехнологий интернет-картографирования составлена технологическая схема разработки Веб-сайта «Геоинформационная система мелиорируемых земель Пермского края» (рис. 13).

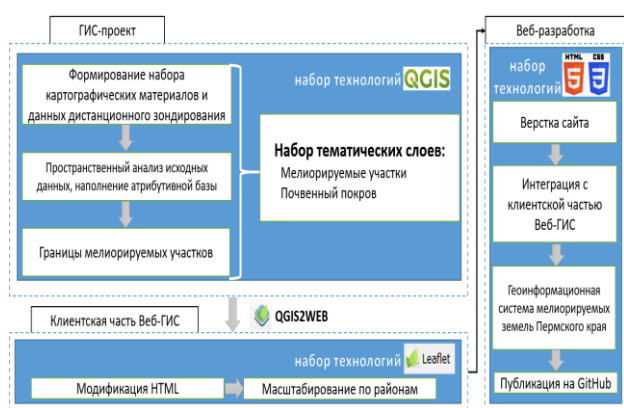


Рис. 13. Технологическая схема разработки ГИС

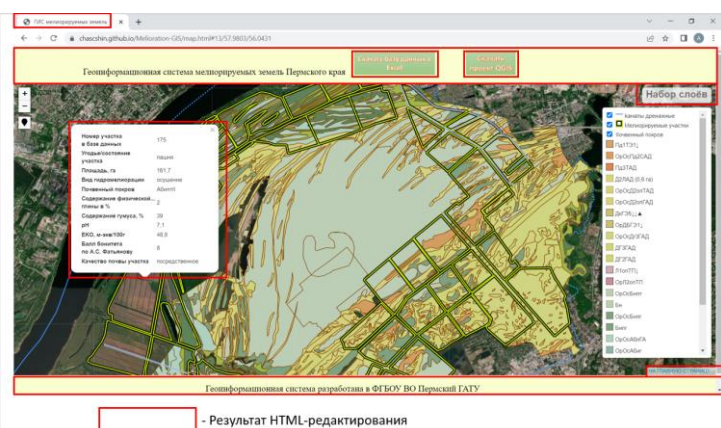


Рис. 14. Итоговый вариант Веб-карты

В результате векторизации мелиорируемых участков и заполнения атрибутов, характеризующих актуальное состояние, площадь, показатели плодородия и качество почв мелиорируемых земель (более 3000 га), сформирована



геопространственная база данных. Из существующего ГИС проекта создано клиентское Веб-приложение и главная страница сайта, которая интегрирована с масштабированными в границах отдельных районов Пермского края мелиорируемыми участками (рис. 14). Разработка главной страницы сайта «Геоинформационная система мелиорируемых земель Пермского края» выполнена на основе технологий HTML и CSS-разметки (рис. 15).

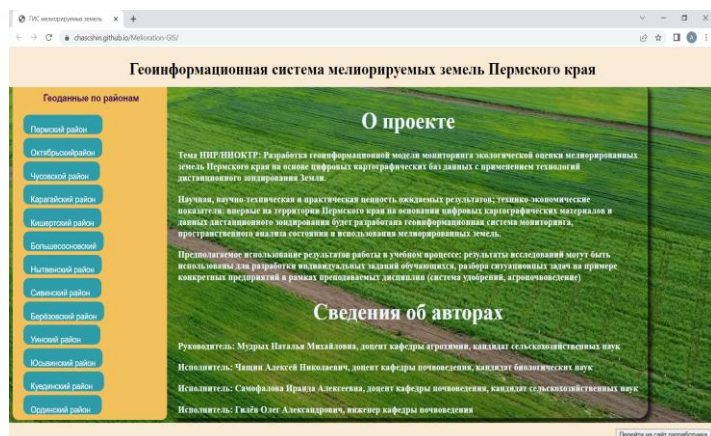


Рис. 15. Вид главной страницы сайта ГИС мелиорируемых земель

Размещение Веб-приложения (хостинг) организовано на платформе GitHub, что существенно сокращает стоимость проекта для конечного потребителя. Открытый доступ к ГИС организован по адресу: <https://chascshin.github.io/Melioration-GIS>.

Экономический результат заключается в снижении и предотвращении потерь природных ресурсов. Социальная эффективность: использование агрономических приложений доступно любому сельхозпроизводителю и позволяет в режиме настоящего времени владеть информацией о плодородии почв, планировать рациональное использование земельных ресурсов сельскохозяйственного предприятия на основе учета природных факторов, актуальных показателей плодородия почв и фактической вовлеченности земель в сельскохозяйственный оборот и повышает устойчивость и эффективность использования угодий.

Научная работа выполнена по государственному заданию Министерства сельского хозяйства, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, по заказу предприятий. Получено 6 свидетельств о регистрации баз данных и программ для ЭВМ по теме исследования.

Теоретические положения и практические выводы опубликованы в монографиях, учебных пособиях, научных статьях и используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ.