Оценка агропроизводственного потенциала виноградопригодных земель по данным мультиспектральной съемки

Проблема: традиционное детальное обследование ампелоценозов и отбор почвенных проб на больших площадях требуют критических финансовых и временных затрат.

Фактор риска: глобальные изменения климата усиливают засушливость и интенсифицируют процессы водной эрозии терруаров, напрямую влияя на кондиции сусла и снижая стабильность качества вин категории ЗГУ (Защищенного географического указания).

Решение: цифровизация педологии и прецизионное виноградарство на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Автоматизированное выделение устойчивых **почвенных паттернов** позволяет дифференцированно управлять потенциалом каждого микроучастка.

Нормативно-методический базис: работа выполнена в рамках государственного задания (тема FGRE-2022-0004.09 «Разработка алгоритма оценки продуктивности ампелоценозов по почвенным агропоказателям и морфометрическим признакам терруаров» и научно-исследовательской работы по комплексной теме 5Ф – КУБАНЬ.1 «Проведение поиска, мобилизации, сохранения и изучения генетических ресурсов винограда для создания сортов нового поколения с высоким потенциалом адаптивности, продуктивности и технологичности с целью получения уникальных высококачественных кубанских вин с наименованием по происхождению»)

ОБЪЕКТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ Исследования

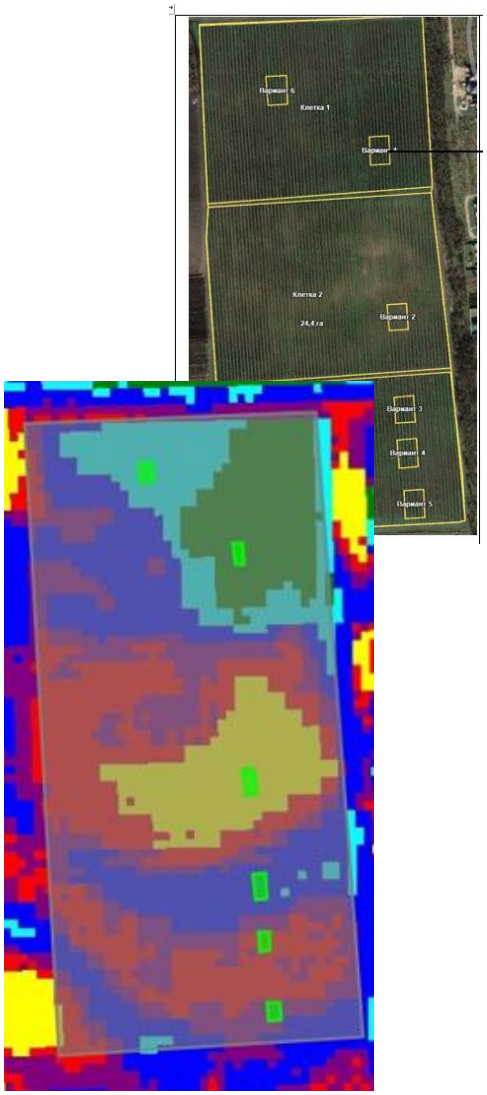
Опытный участок: Виноградное насаждение сорта Шардоне (2019 г. посадки, подвой Кобер 5ББ, схема 2,5 × 1,0 м). Площадь — **23,46 га**. Локация — Анапский район Краснодарского края (п. Просторный), стык тяжелосуглинистых материковых и песчаных приморских пород.

Данные ДЗЗ: Спутниковые мультиспектральные снимки **Sentinel-2** за период 2022–2025 гг. (разрешение 10–20 м) с применением облачной маски Fmask.

Аналитический стек: Облачная платформа Google Earth Engine (GEE), QGIS, языки JavaScript и Python 3.10 (библиотеки scikit-learn, geemap, pandas, matplotlib).

Машинное обучение: Классификатор **Random Forest** (ансамбль из 50–100 деревьев решений), обученный по географическим координатам точек наземных шурфов и агрохимических баз данных СКФНЦСВВ.

Используемая система нормализованных индексов *Почвенные маркеры:* **CMR** (глинистые минералы), **NDSI** (содержание песка), **SI** (карбонатность), **SOCI** (органический углерод/гумус), **BI** (индекс яркости/эрозии). *Вегетационные маркеры:* **NDVI** (биомасса), **NDWI** (водный стресс), **SAVI** (с поправкой на фон открытой почвы), **ELI** (состояние листового аппарата).



Виноградник 24,3 га Анапского района, год посадки - весна 2019 года, сорт – Шардоне, схема посадки - 2,5 м на 1,0 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ

Зонирование агропроизводственного потенциала

Интеграция данных ДЗЗ с результатами наземного анализа повысила точность классификации Random Forest на **13%** (общая точность по тестовой выборке составила **88%**, коэффициент Каппа $\kappa > 0,8$).

Выделено 3 класса агропроизводственного потенциала земель (согласно СТО):

Высокий потенциал (40% площади): Черноземы тяжелосуглинистые. Гумус ≈ 3%, pH 6,5–7,0, высокий уровень подвижных P_2O_5 и K_2O.

Средний потенциал (35% площади): Склоновые среднесуглинистые почвы. Гумус ≈ 2%, pH 7,0–7,5, периодический дефицит почвенной влаги.

Низкий потенциал (25% площади): Маломощные супесчаные и карбонатные почвы. Гумус < 1%, pH > 7,5, высокая щелочность и риск засухи.

Математическое моделирование продуктивности ампелоценоза

На основе многолетней динамики вегетационных индексов построена многофакторная регрессионная модель прогноза урожайности (коэффициент детерминации $R^2 = 0,86$)

Индикаторы стресса: Оптимальные пороги стабильной продуктивности составляют NDVI > 0,50; NDWI > -0,40; ELI > 1,50. Выход за данные границы сигнализирует о депрессии растений и водном стрессе куста.

Лидером фактической урожайности выступает высокогумусный влагоемкий микроучасток № 6 (3,37 кг/куст).

Спектральные паттерны и моделирование продуктивности

Спектральные паттерны почв и растительного покрова были выделены на основе индексов NDVI, NDWI и ELI.

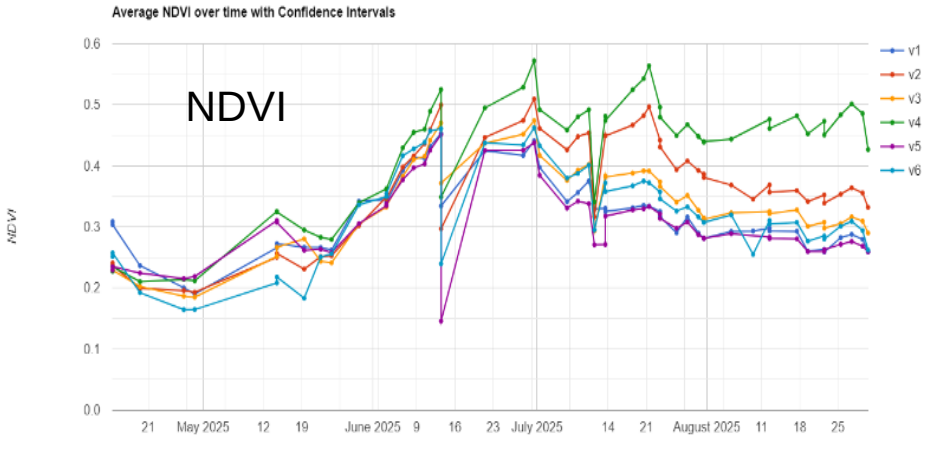
Анализ многолетней динамики показал выраженную чувствительность индексов к состоянию растений в фазу активного роста, а также различия между почвенными вариантами, особенно в условиях водного стресса.

Вегетационные индексы как индикаторы:

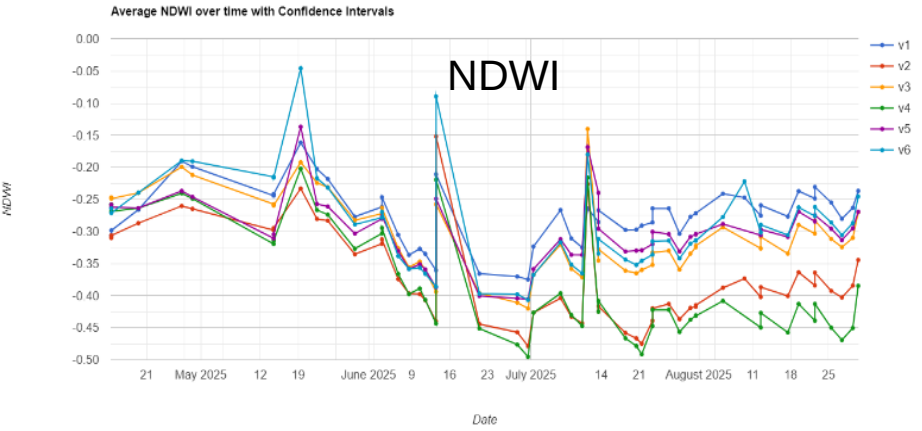
- NDVI — биомасса (корреляция 0,84–0,88)
- NDWI — отражает водный стресс
- ELI — состояние листового аппарата

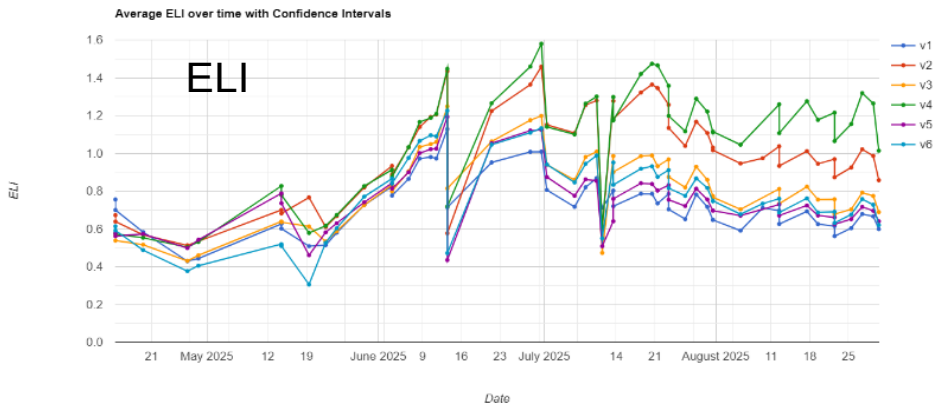
Оптимальные пороги продуктивности:

- NDVI > 0,50
- NDWI > –0,40
- ELI > 1,50



Выход показателей за пределы оптимальных значений приводит к выраженному снижению урожайности. Графики вегетационных индексов NDVI, NDWI, ELI для шести вариантов почвенных паттернов за вегетационный приод 2025 г.





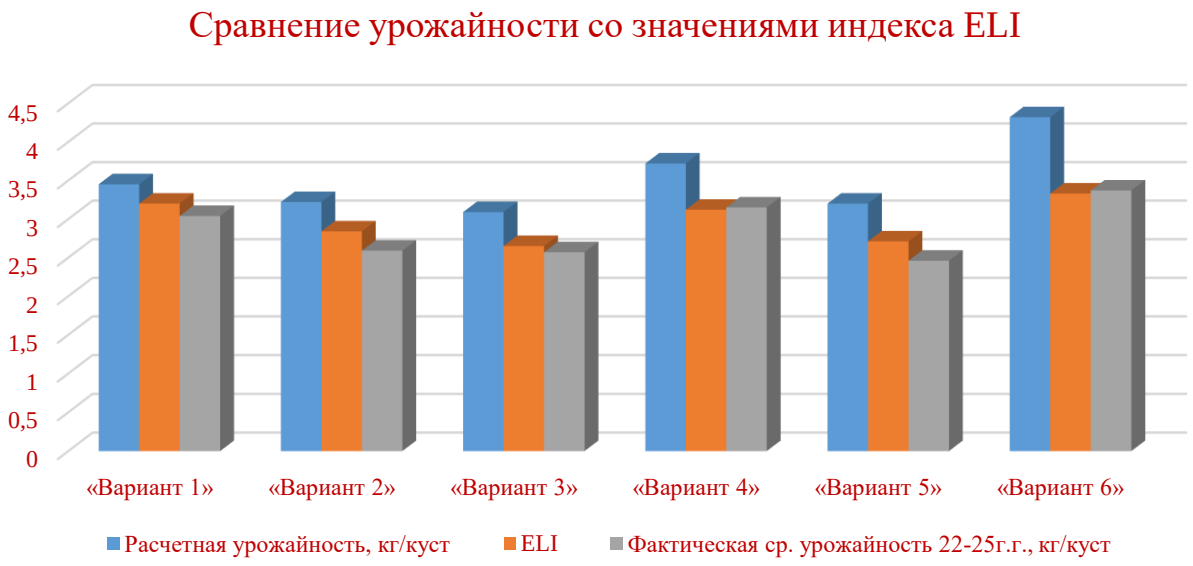
Модель продуктивности по спектральным индексам

На основе индексных данных построена модель:

$$Y=2{,}18\cdot NDVI+0{,}87\cdot NDWI+0{,}41\cdot ELI-0{,}52$$

Где NDVI — индексы первого порядка для оценки продуктивности виноградника, NDWI — индикатор водного баланса и риска засухи, ELI — показатель физиологического состояния кроны. **Коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}86$, т.е. модель объясняет 86% изменчивости зависимой переменной. Коэффициенты корреляции (r) спектральных индексов с урожайностью составили: NDVI — 0,88; NDWI — 0,63; ELI — 0,81.**
Сочетание значений NDVI > 0,5, NDWI > −0,4, ELI > 1,5 соответствует оптимальным условиям вегетации и максимальной продуктивности.

ELI (r = 0,81) — показывает, что увеличение листового индекса прямо связано с ростом урожайности



Преимущества модели:
Объясняет более 85% изменчивости урожайности
Учитывает локальные различия индекса вегетации растений
Надёжный инструмент для оперативного прогноза состояния насаждений по спутниковым данным

Аналитический блок: урожайность и климатические факторы

Оценка урожайности по данным агроучётов.

Исследование показало устойчивую дифференциацию продуктивности между шестью почвенными вариантами. Наиболее высокие значения отмечены в вариантах 4 и 6, тогда как варианты 2 и 3 характеризуются пониженной урожайностью, что согласуется с их агрохимической спецификой.

Вариант	Фактическая ср. урожайность 22-25г.г., кг/куст	Расчётная ср. урожайность 22-25г.г., кг/куст	Группа продуктивности	Особенности
«Вариант 6»	3.37	4.32	A	Лидер по урожайности, максимум калия (37 мг/100г), высокий гумус (2,1%)
«Вариант 4»	3.15	3.72	B	Сбалансированный состав, идеальный pH (6,8), стабильная урожайность
«Вариант 1»	3.04	3.45	B	Максимум фосфора (11,1 мг/100г), высокая масса гроздей
«Вариант 2»	2.59	3.22	C	Низкий гумус (0,58%) и калий, повышенный риск засухи
«Вариант 3»	2.57	3.09	C	Высокие карбонаты, низкий фосфор (1,6 мг/100г), проблемная щелочность
«Вариант 5»	2.46	3.2	C	Средний гумус, щелочная реакция, дефицит фосфора



Динамика осадков:

На основе многолетних данных установлено, что 2025 год стал самым засушливым за весь наблюдаемый период: Снижение запасов влаги отразилось на снижении урожайности в чувствительных вариантах (2 и 3), но Варианты 4 и 6 показали устойчивость, что связано с лучшей структурой почв и способностью удерживать влагу.

Модель связи урожайности с помесячными объёмами осадков:

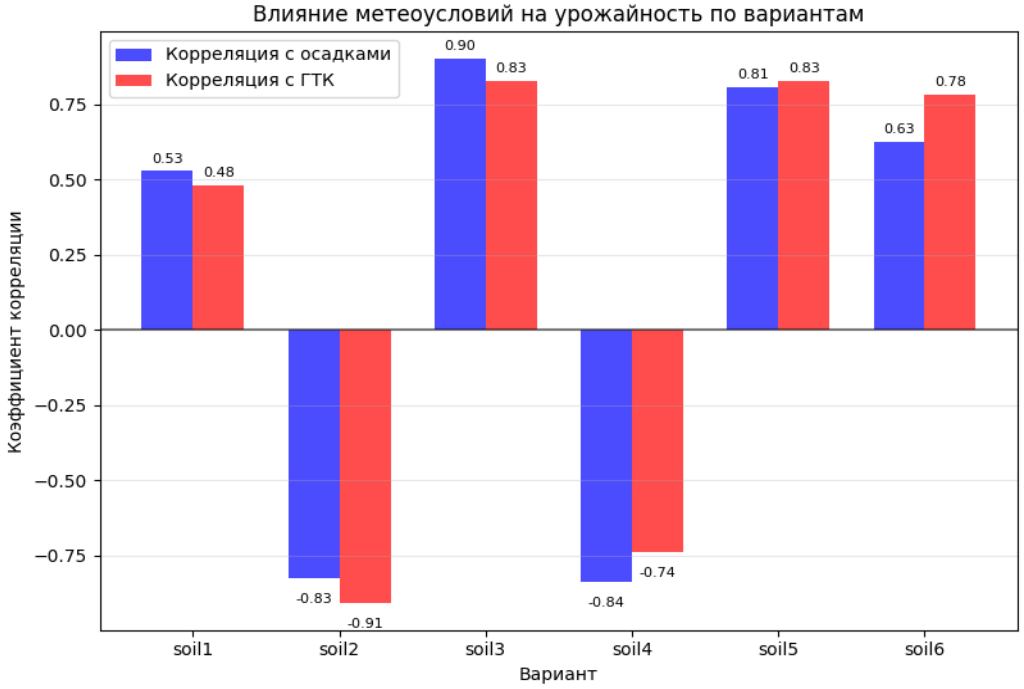
$$Y = 6{,}358 + 0{,}032 \times P_6 - 0{,}041 \times P_7 + 0{,}028 \times P_8,$$

где Y — прогнозная урожайность (кг/куст); P_6, P_7, P_8 — сумма осадков (мм) в июне, июле и августе соответственно. Коэффициент детерминации: R2=0,74

Особенности модели:

- Июньские осадки оказывают положительное влияние на развитие куста;
- Избыточные осадки в июле приводят к снижению продуктивности;
- Августовская влага играет поддерживающую роль.

Корреляция с осадками и ГТК урожайности вариантов почвенных участков



Коэффициенты корреляции урожайности виноградного растения с осадками и ГТК почвенных участков оказались положительными для «Вариантов 1, 3, 5 и 6» и отрицательными для « Вариантов 2 и 4». Максимальное зависимость урожайности от метеоусловий – для «Вариант 3 и 5», а минимальное для «Вариант 2 и 4» .

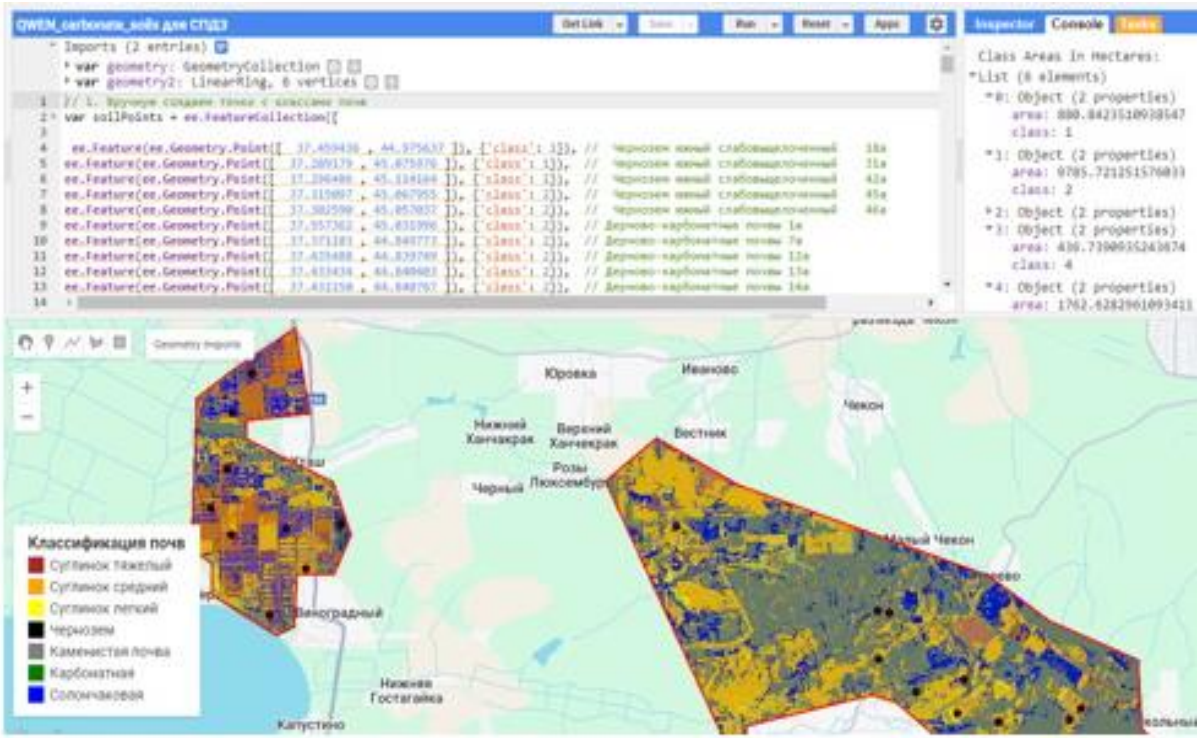
Характеристика выделенных спектральных паттернов

В композиции индексов NDVI, SAVI, NDWI и ELI, выделены три устойчивых типа спектральных паттернов. Каждый из них отражает совокупность почвенных, морфометрических и водно-физических свойств участка, а также состояние виноградного растения в разные фенологические фазы. Полученные паттерны воспроизводятся из года в год, что указывает на стабильность почвенно-терруарных различий.

Сопоставление паттернов с фактической урожайностью позволило выделить три группы:

– Группа А (высокая продуктивность): соответствует паттерну 1;
– Группа В (средняя продуктивность): соответствует паттерну 2;
– Группа С (пониженная продуктивность): соответствует паттерну 3.

Разработанная нами программа на основе данных Sentinel-2 и базы данных почвенных проб позволяет автоматически распознавать виноградопригодные почвы Анапского и Темрюкского районов по терруарным паттернам.




РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025668308

Программа «Spectrosoil-vin» автоматизированного распознавания почвенных паттернов виноградных насаждений

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия" (RU)*

Авторы: *Орлов Виталий Александрович (RU), Лукьянов Алексей Александрович (RU), Михайловская Олеся Ивановна (RU)*

Заявка № **2025667329**
Дата поступления **18 июня 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***14 июля 2025 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Технологическая верификация и заключение

Верификация качества вина: мониторинг (2022–2025 гг.) показал, что стабильные тяжелосуглинистые черноземы (паттерны 1, 3, 6) обеспечили максимальное накопление приведенного экстракта в сухих виноматериалах Шардоне — **до 23,7–23,9 г/дм³** (при норме ЗГУ не менее 17,0 г/дм³) и оптимальный глюкоацидометрический показатель созревания ягод (2,8–3,1).

Устойчивость в засуху: В экстремально засушливом 2024 году легкие супесчаные почвы за счет специфики доступности капиллярной влаги минимизировали водный стресс насаждений. Дегустационная оценка вина с этого участка составила **84,6 балла**, превзойдя среднесуглинистые склоновые варианты.

Практическая ценность: Объединенный в модуле «Spectrosoil-vin» комплекс моделей позволяет предприятиям отказаться от тотальных почвенных анализов, оперативно выявлять очаги эрозии и точечно дифференцировать нормы полива, питания и почвенной защиты (мульчирование, задернение междурядий).

Практическая значимость

Полученные результаты позволяют:

- Выявлять участки с риском потери продуктивности
- Оценивать водный стресс и прогнозировать его влияние на урожай
- Картировать терруарные паттерны с учётом агрохимии и спектральных данных
- Прогнозировать продуктивность по спутниковым индексам
- Оптимизировать агротехнические решения (полив, питание, механическая обработка)
- Интегрировать данные в модуль Spectrosoil-Vin для цифровых систем управления виноградниками

Модели (климатическая и спектральная) образуют единый модуль, которые используются совместно как для научного анализа, так и для регулярного мониторинга агропроизводственного потенциала виноградопригодных земель.