24-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
Москва, ИКИ РАН, 2026 г.

Метод повышения пространственного разрешения полученных по данным MODIS карт с 230 до 10 м путём переноса разметки на данные Sentinel-2

А.В. Кашницкий
kashnitskii@d902.iki.rssi.ru

Институт космических исследований РАН, Москва

Карты ИКИ РАН по данным MODIS

230 м — пространственное разрешение: один пиксель MODIS — участок 230 × 230 м

2001–2025 — годы, за которые доступны ежегодные карты растительного покрова



Рис. 0. Пример карты типов растительного покрова за 2025 год

- серия карт растительного покрова России: типы растительного покрова, пахотные земли, преобладающие лесные породы, гибель лесов от пожаров, характеристики лесов и другие
- карты регулярно обновляются и охватывают всю территорию страны
- в связи с планируемым завершением программы MODIS подобные карты предполагается строить по данным других приборов, например VIIRS; принципы останутся прежними, а разрешение — того же порядка

Разрешения 230 м во многих случаях недостаточно

Одна из задач — ведение национального кадастра парниковых газов: в основу учёта заложена межгодовая динамика площадей земного покрова в 6 классах МГЭИК

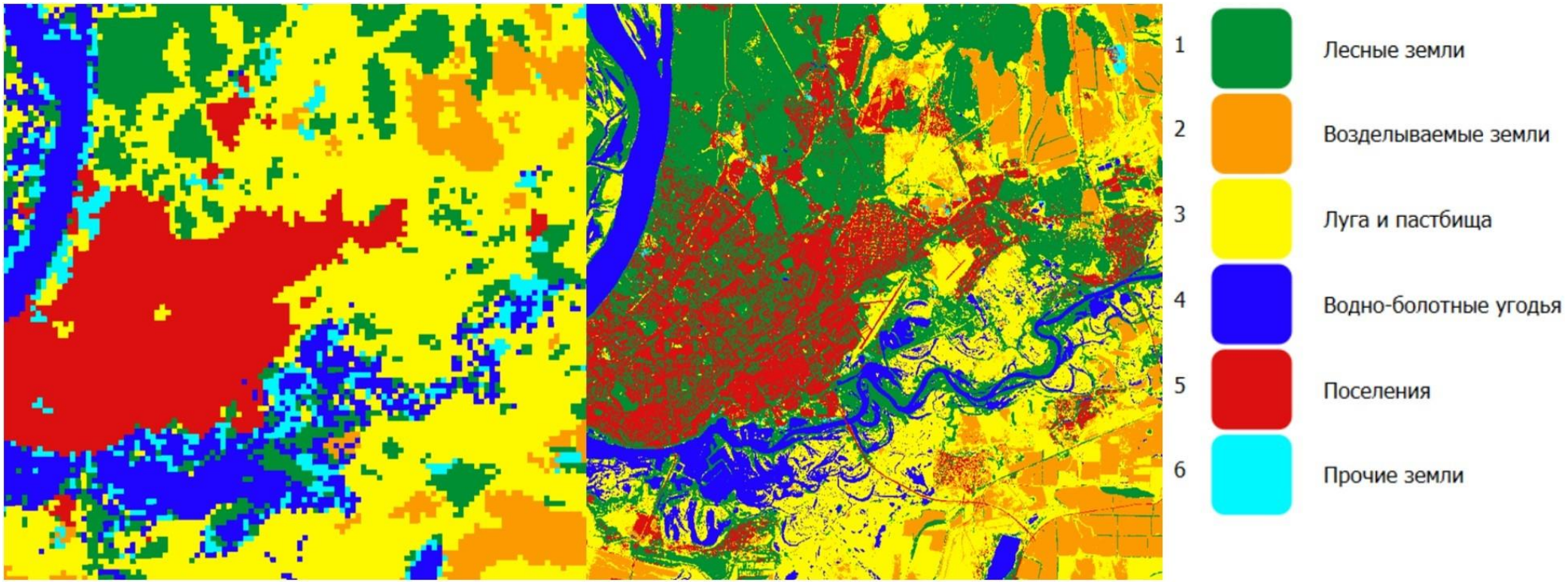


Рис. 1. Иллюстрация проблемы недостаточности пространственного разрешения существующих карт. Многие мелкие структуры размечаются единым 230-м пикселем преобладающего класса. Здесь и далее легенда классов соответствует приведённой на рис. 1*в*

Предлагаемое решение — перенос разметки на Sentinel-2

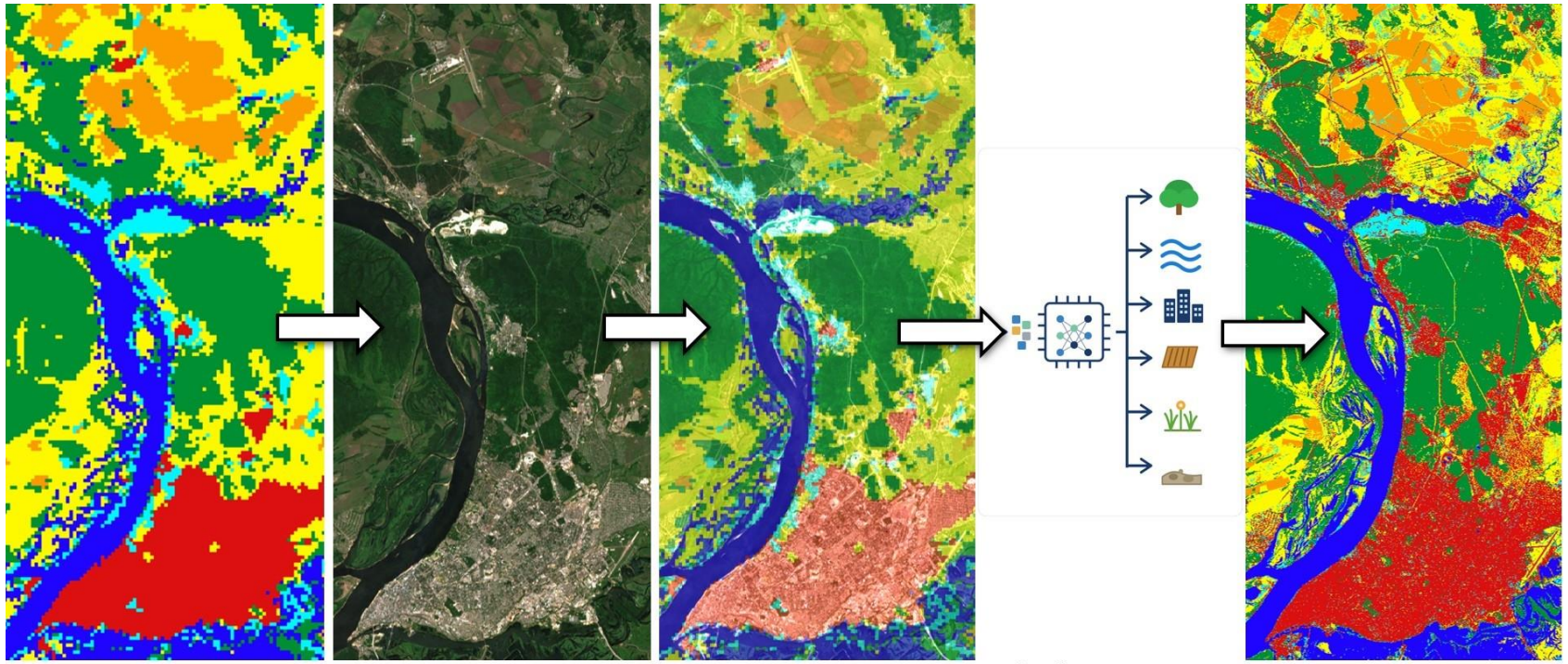


Рис. 2. Основные этапы предлагаемого метода улучшения разрешения карты

Идея

Классификация данных Sentinel-2; обучающая выборка — из существующих карт по MODIS

230 → 10 м: в 23 раза

Каждому пикселю снимков Sentinel-2 назначается класс по спектрально-временным признакам

Ключевой фактор

Эталон высокого разрешения не нужен; решает качество обучающей выборки

Существующие карты землепользования по данным ДЗЗ

230–1000 м

Низкое и среднее разрешение

- MODIS, VIIRS, PROBA-V и др., в т. ч. карты ИКИ РАН
- **Преимущество** — регулярное обновление и охват больших территорий
- **Недостаток** — эффект смешанного пикселя: мелкие неоднородные структуры отображаются недостаточно точно

10–30 м

Высокое разрешение (Sentinel-2, Landsat)

- ESA WorldCover, Dynamic World, Esri Land Cover, GLC
- **Недостаток** — уступают по числу тематических классов или по точности отнесения пикселей к классам (не по детализации)
- WorldCover — наибольшая пространственная детальность (Xu et al., 2024) → эталон для валидации

Разрыв между регулярно обновляемыми, но грубыми картами и более детальными, но уступающими им по числу классов или точности. Цель работы — сократить его, повысив разрешение имеющихся карт MODIS с помощью данных Sentinel-2

Подробный обзор: Мятлев и др., 2026

Методы повышения пространственного разрешения

Группы различаются прежде всего типом обрабатываемых данных; машинное обучение применяется во всех группах

1

Интерполяция и передискретизация

ближайший сосед, билинейная, бикубическая

не привносят новой пространственной информации

2

Паншарпенинг и слияние данных

для пары MODIS — Landsat/Sentinel-2: STARFM, ESTARFM, FSDAF

Как правило восстанавливают каналы, а не тематическую разметку

3

Субпиксельное картографирование

положение субпикселей по долям классов в смешанных пикселях

зависит от модели пространственной структуры

4 **настоящая работа**

Перенос тематической разметки

карта низкого разрешения — источник обучающих меток

эталонная карта высокого разрешения не нужна

Отличие от близких работ

В них способ отбора надёжных меток фиксирован и задан априори; здесь он — предмет исследования: предложены и сопоставлены шесть существенно разных стратегий отбора, оценённых напрямую относительно эталона и по результату итоговой классификации

Перенос разметки: Radoux et al., 2014; Zhang, Roy, 2017; Pan et al., 2025; Xie et al., 2019

Спутниковые данные и картографические продукты

Sentinel-2 MSI

3 сезона

90-дневные медианные безоблачные композиты: весна, лето, осень

- каналы B2, B3, B4, B8, B11 — видимый, ближний и средний ИК
- каналы красного края повышают общую точность лишь примерно на 1 %; больший прирост даёт число временных срезов, а не каналов
- 4 из 5 каналов имеют собственное разрешение 10 м — без интерполяции, размывающей границы классов
- данные получены с помощью ЦКП «ИКИ-Мониторинг»

Картографические продукты

230 м

исходная разметка, 2001–2025 гг.

ежегодные карты ландшафтного покрова ИКИ РАН;
23 исходных класса переведены в 6 классов МГЭИК

10 м

эталон для валидации, 2020–2021 гг.

ESA WorldCover (одна из наиболее точных и наиболее детальная среди имеющихся 10 м карт на всю страну)
11 исходных классов переведены в 6 классов МГЭИК

Кашницкий и др., 2022 - про использованные композиты; Барталев и др., 2016 - про карты по данным MODIS; Zanaga, et al, 2021 – про карту ESA WorldCover.

Тестовая территория, обучающая выборка и модель

39UVV

тестовый тайл, 2020 г.

- Самарская область; 10980 × 10980 пикселей (109,8 × 109,8 км)
- распределение по 6 классам близко к их соотношению на всей территории области

5000

признаков на класс

- признак — 15 спектрально-временных значений пикселя (5 каналов × 3 сезона) с меткой класса
- объём фиксирован по минимально представленному классу (чаще — «прочие»): все способы в одинаковых условиях
- при загрублении до 230 м — 700–800 признаков на класс

RandomForest

(реализация из scikit-learn, параметры по-умолчанию, кроме числа деревьев (50)

- устойчив к шуму в метках, снижает риск переобучения, эффективно распараллеливается
- временное упрощение для проверки гипотез; далее — нейросетевая семантическая сегментация

Шесть способов извлечения выборки из карты MODIS

1 Случайный

случайные пиксели под каждым пикселем MODIS

2 Надёжный

только пиксели вдали от границ классов (блок 3×3)

На основе надёжных областей способа 2 — дополнительный отбор

3 Однородный

разброс NDVI внутри пикселя MODIS

4 Текстурный

характерный для класса градиент NDVI

5 Эталонный

близость к эталонному признаку класса

6 Очистка эталонного

удаление пикселей, похожих на эталоны других классов

Оценка качества выборки

напрямую («Выборка»): сравнение извлечённых признаков с эталоном WorldCover;
косвенно («Карта») — сравнение построенной карты с эталоном;
P — precision, R — recall, F_1 — F_1-score

Схема с загрублением (способы 1–3)

модель обучается на данных Sentinel-2, загрублённых усреднением до 230 м, и классифицирует исходные пиксели 10 м

Способ 1: выбор случайных признаков

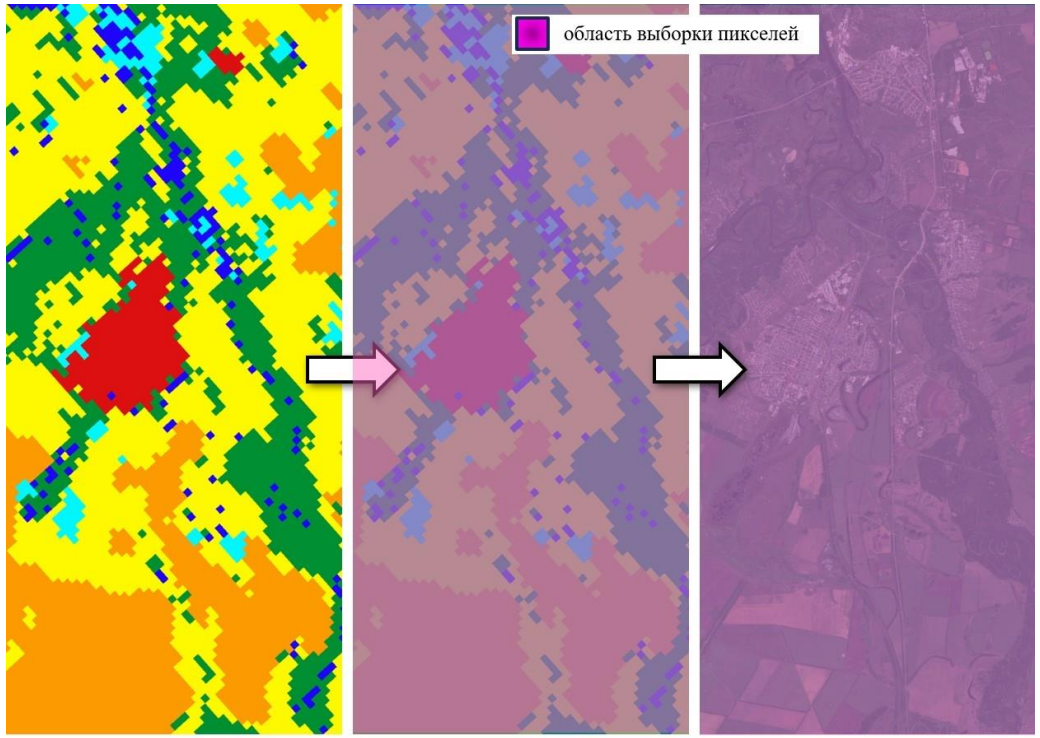


Рис. 3. Схема извлечения выборки случайным способом (способ 1)

Табл. 1. Валидация способа 1 (случайный) относительно WorldCover: прямая оценка извлечённой выборки, классификация построенной карты при обучении на исходных данных 10 м и на загрублённых данных 230 м

Класс	Выборка			Карта 10 м			Карта 230 м		
	P	R	F_1	P	R	F_1	P	R	F_1
лесные земли	0,85	0,49	0,63	0,95	0,81	0,88	0,93	0,82	0,87
возделываемые земли	0,86	0,56	0,68	0,98	0,84	0,90	0,96	0,84	0,89
пастбища	0,57	0,45	0,50	0,79	0,80	0,80	0,79	0,75	0,77
водно-болотные угодья	0,68	0,83	0,75	0,66	0,92	0,77	0,62	0,93	0,74
поселения	0,54	0,82	0,65	0,33	0,88	0,48	0,50	0,72	0,59
прочие земли	0,04	0,34	0,07	0,03	0,20	0,05	0,03	0,30	0,05
accuracy			**0,58**			**0,82**			**0,81**
macro avg	0,59	0,58	0,55	0,62	0,74	0,64	0,64	0,73	0,65
weighted avg	0,72	0,58	0,62	0,89	0,82	0,85	0,88	0,81	0,84

- под каждым пикселем карты MODIS случайно отбирается фиксированное число пикселей Sentinel-2
- **зашумлённость:** лесополосы, дороги, узкие реки и парки помечены классом окружения; способ — базовый ориентир

Способ 2: надёжные признаки, удалённые от границ

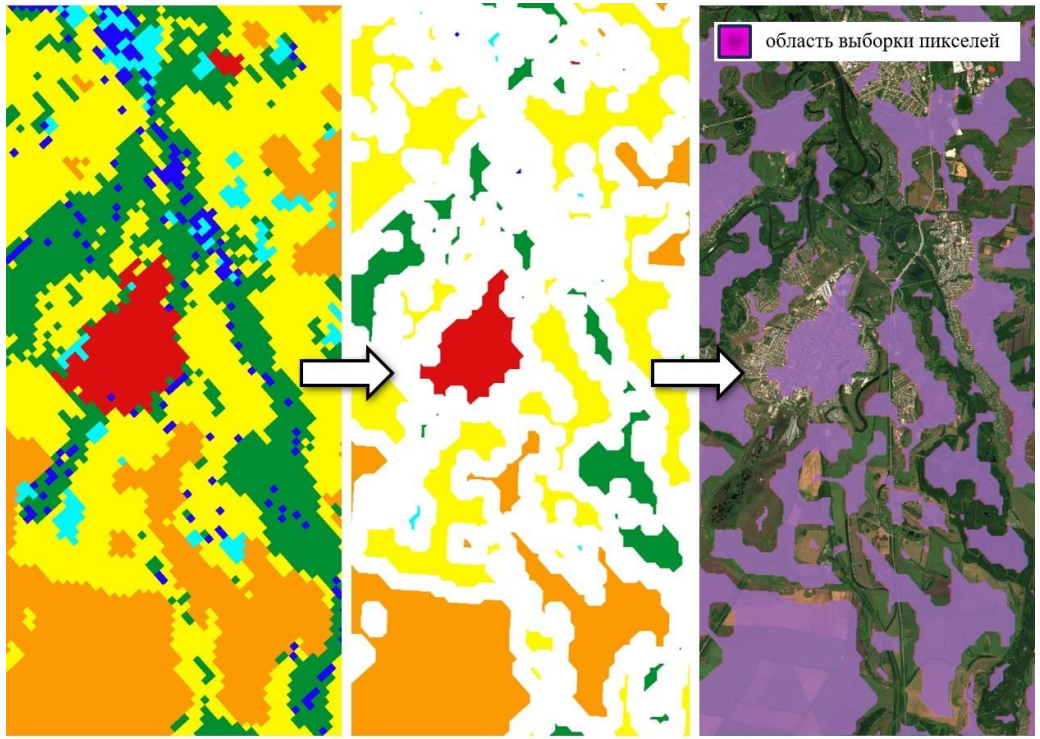


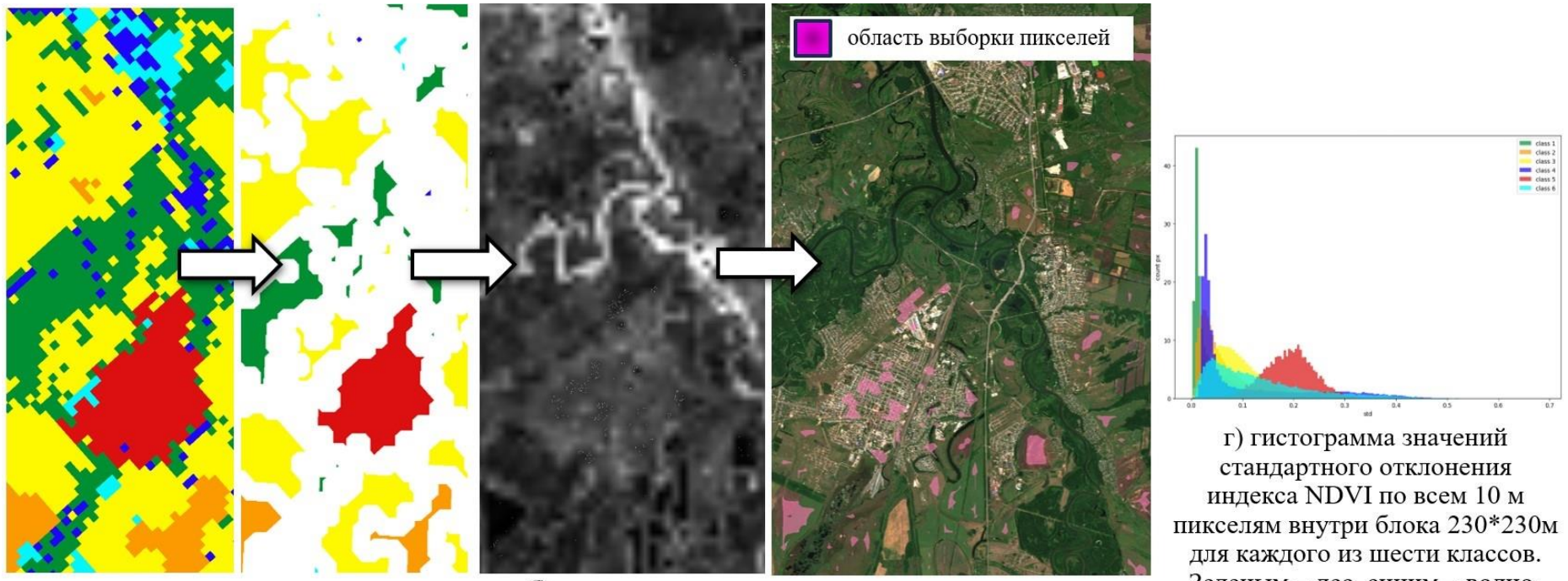
Рис. 4. Схема извлечения выборки надёжным способом (способ 2)

Табл. 2. Валидация способа 2 (надёжный) относительно WorldCover: прямая оценка извлечённой выборки, классификация построенной карты при обучении на исходных данных 10 м и на загрублённых данных 230 м

Класс	Выборка			Карта 10 м			Карта 230 м		
	P	R	F_1	P	R	F_1	P	R	F_1
лесные земли	0,95	0,62	0,75	0,95	0,83	0,89	0,95	0,83	0,89
возделываемые земли	0,92	0,70	0,80	0,98	0,86	0,92	0,95	0,85	0,89
пастбища	0,69	0,61	0,65	0,77	0,86	0,81	0,78	0,79	0,78
водно-болотные угодья	0,94	0,97	0,96	0,82	0,83	0,83	0,71	0,92	0,80
поселения	0,63	0,70	0,66	0,33	0,75	0,46	0,58	0,50	0,54
прочие земли	0,18	0,80	0,29	0,08	0,32	0,13	0,05	0,50	0,09
accuracy			**0,71**			**0,85**			**0,82**
macro avg	0,72	0,73	0,68	0,65	0,74	0,67	0,67	0,73	0,67
weighted avg	0,81	0,71	0,74	0,89	0,85	0,86	0,88	0,82	0,85

- по 230-м карте оставляются пиксели, вся окрестность которых (блок 3×3) принадлежит тому же классу
- **лучший результат** среди всех способов; опережает схему с загрублением примерно на 3 %, выбран для итоговой карты

Способ 3: выбор признаков из однородных областей



а) определяем надёжные области по данным MODIS (230 м)

б) под каждым “надежным” 230 м пикселем вычисляем дисперсию значений NDVI по 10 м данным

в) определяем однородные зоны по порогу стандартного отклонения и отбираем 10 м пиксели только в этих зонах

г) гистограмма значений стандартного отклонения индекса NDVI по всем 10 м пикселям внутри блока 230*230м для каждого из шести классов. Зеленым – лес, синим – водно-болотные угодья, желтым – луга и пастбища, оранжевым – пашня, красным – постройки, голубым – прочие земли

Рис. 5. Извлечение выборки по однородности (способ 3): по карте MODIS (230 м) выделяются надёжные области, под каждым надёжным 230-м пикселем по данным 10 м рассчитывается стандартное отклонение NDVI σ_{NDVI}, по порогу σ_{NDVI} (отдельно по каждому классу) выделяются однородные зоны, и из пересечения однородных и надёжных областей отбираются пиксели 10 м. На гистограммах — значения σ_{NDVI} по всем 10-м пикселям внутри блоков 230×230 м для каждого из 6 классов

Способ 3: результаты валидации

Табл. 3. Валидация способа 3 (однородный) относительно WorldCover: прямая оценка извлечённой выборки, классификация построенной карты при обучении на исходных данных 10 м и на загрублённых данных 230 м

Класс	Выборка			Карта 10 м			Карта 230 м		
	P	R	F_1	P	R	F_1	P	R	F_1
лесные земли	0,97	0,82	0,89	0,96	0,76	0,85	0,94	0,83	0,88
возделываемые земли	1,00	0,44	0,61	0,99	0,54	0,70	0,98	0,59	0,73
пастбища	0,58	0,52	0,55	0,62	0,75	0,68	0,70	0,76	0,73
водно-болотные угодья	1,00	0,97	0,98	0,96	0,65	0,78	0,90	0,86	0,88
поселения	0,42	1,00	0,59	0,13	0,96	0,23	0,29	0,90	0,43
прочие земли	0,01	0,06	0,02	0,01	0,07	0,01	0,01	0,13	0,01
accuracy			**0,65**			**0,66**			**0,71**
macro avg	0,66	0,63	0,61	0,61	0,62	0,54	0,64	0,68	0,61
weighted avg	0,84	0,65	0,70	0,86	0,66	0,72	0,87	0,71	0,77

Обучение на загрублённых до 230 м данных: общая точность 0,71 против 0,66 на 10 м, но и это ниже, чем у надёжного способа

Порог однородности класса *c*

$$Q_c^{(p)} = \text{quantile}(\{\sigma_{NDVI}(b) : b \in B, c(b) = c\}, p)$$

отбор: $\sigma_{NDVI}(b) \le Q_c^{(p)}$, $p = 10\ \%$

B — блоки 23×23 пикселя под пикселями карты MODIS

- гипотеза: внутри размеченных областей остаются неоднородности — деревья и газоны дворов под «поселениями», вода у берега
- **точность падает:** чем жёстче порог, тем сильнее выборка теряет разнообразие; при $p = 100\ \%$ способ вырождается в надёжный
- при жёстком пороге под разметкой «поселений» оказываются признаки лесов и лугов
- «поселения» хорошо отделяются — карту однородности можно использовать как дополнительный признак

Способ 4: выбор по характерному текстурному покрову

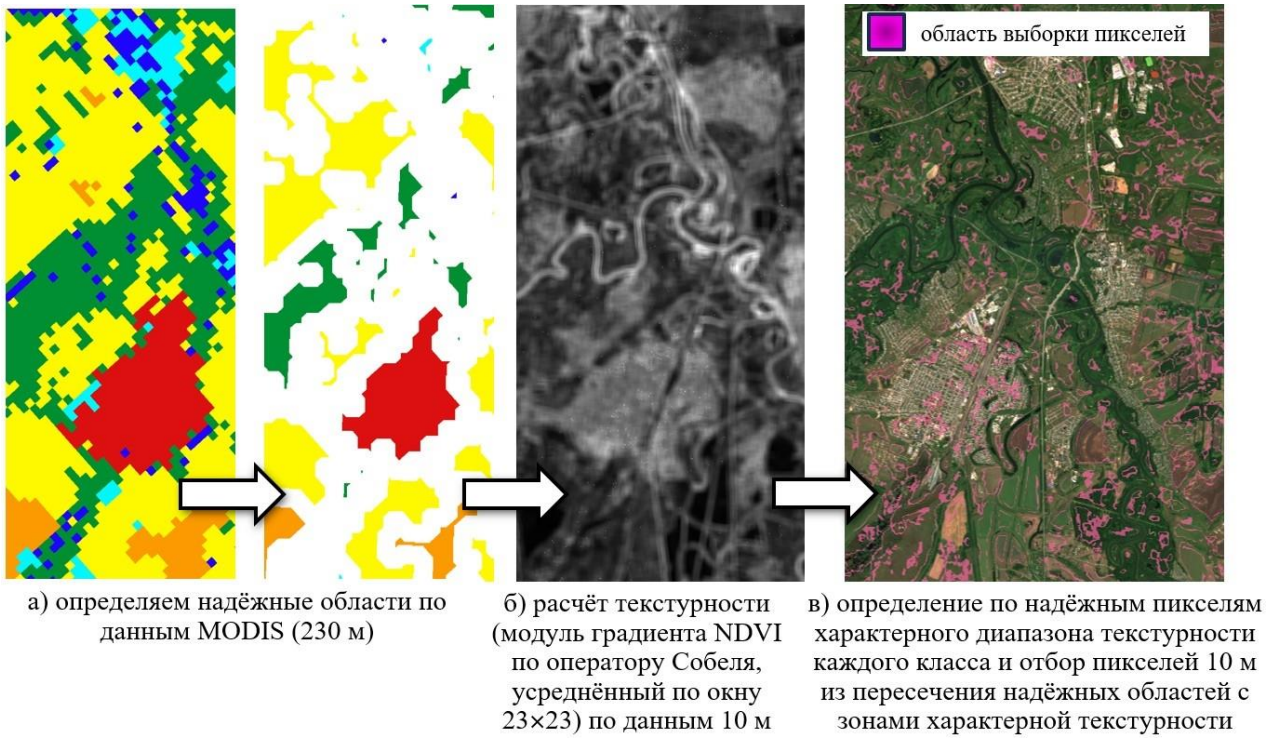


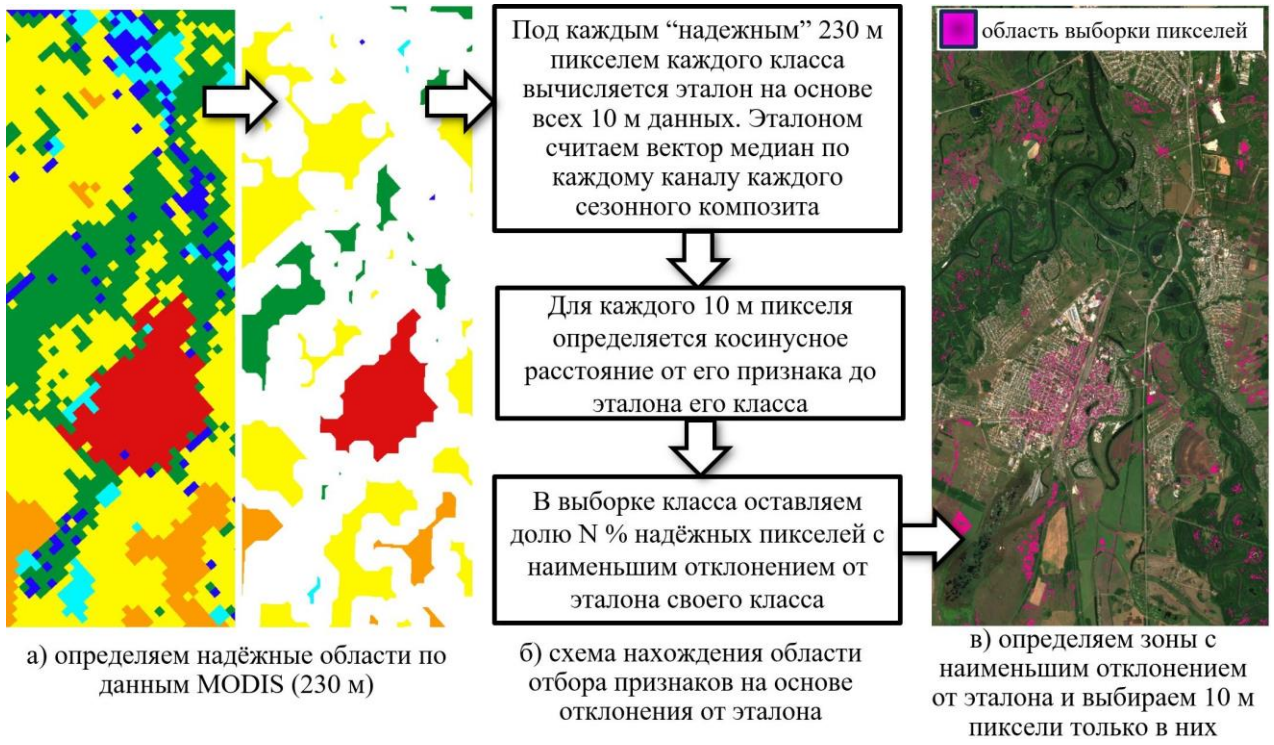
Рис. 6. Извлечение выборки по текстурности (способ 4): по карте MODIS (230 м) выделяются надёжные области, по данным 10 м рассчитывается текстурность (модуль градиента NDVI по оператору Собеля, усреднённый по окну 23×23), по надёжным пикселям определяется характерный диапазон текстурности каждого класса, и из пересечения надёжных областей с зонами характерной текстурности отбираются пиксели 10 м

Табл. 4. Валидация способа 4 (текстурный) относительно WorldCover: прямая оценка извлечённой выборки и классификация построенной карты при обучении на исходных данных 10 м

Класс	Выборка			Карта 10 м		
	P	R	F_1	P	R	F_1
лесные земли	0,89	0,50	0,64	0,95	0,78	0,86
возделываемые земли	0,92	0,61	0,73	0,97	0,87	0,92
пастбища	0,63	0,47	0,54	0,82	0,74	0,78
водно-болотные угодья	0,60	0,86	0,71	0,54	0,91	0,68
поселения	0,62	0,93	0,75	0,32	0,89	0,47
прочие земли	0,05	0,50	0,09	0,03	0,27	0,05
accuracy			**0,61**			**0,81**
macro avg	0,62	0,65	0,58	0,61	0,74	0,63
weighted avg	0,76	0,61	0,65	0,89	0,81	0,84

- текстурность = $|\nabla NDVI| = \sqrt{(sobel_x^2 + sobel_y^2)}$, окно 23×23; отбор между квантилями 0,45 и 0,55
- точнее однородного и приближается к надёжному, **но уступает ему**

Способ 5: эталонный признак и отбор похожих на него



а) определяем надёжные области по данным MODIS (230 м)

б) схема нахождения области отбора признаков на основе отклонения от эталона

в) определяем зоны с наименьшим отклонением от эталона и выбираем 10 м пиксели только в них

Рис. 7. Извлечение выборки по эталонному признаку (способ 5): по карте MODIS (230 м) выделяются надёжные области; по надёжным областям каждого класса вычисляется эталон — вектор медиан по каждому каналу каждого сезонного композита (данные 10 м), после чего для каждого надёжного 10-м пикселя определяется косинусное расстояние от его признака до эталона его класса; в выборке класса оставляется доля *n* % надёжных пикселей с наименьшим отклонением от эталона своего класса

Табл. 5. Валидация способа 5 (эталонный) относительно WorldCover: прямая оценка извлечённой выборки и классификация построенной карты при обучении на исходных данных 10 м

Класс	Выборка			Карта 10 м		
	P	R	F_1	P	R	F_1
лесные земли	0,99	0,71	0,83	0,91	0,87	0,89
возделываемые земли	0,92	0,77	0,84	0,92	0,84	0,88
пастбища	0,86	0,62	0,72	0,83	0,73	0,78
водно-болотные угодья	1,00	1,00	1,00	0,96	0,82	0,88
поселения	0,64	0,75	0,69	0,33	0,77	0,46
прочие земли	0,14	0,69	0,23	0,05	0,42	0,08
accuracy			**0,75**			**0,81**
macro avg	0,76	0,75	0,72	0,67	0,74	0,66
weighted avg	0,87	0,75	0,79	0,88	0,81	0,84

- эталон — вектор медиан по каналам и сезонам; в выборке — 10 % надёжных пикселей, ближайших к нему по косинусному расстоянию
- **лучше всех попадает в эталон,** но по точности карты — третье место

Способ 6: очистка похожих из областей других классов

Эталон, косинусное расстояние и порог отбора (способы 5 и 6)

$$\boldsymbol{y}_{c,i} = \text{median}\{\, x_i(u) : u \in R_c \,\},\ \ i = 1\ldots15$$

$$d_c(\boldsymbol{x}) = 1 - (\boldsymbol{x} \cdot \boldsymbol{y}_c) \,/\, (|\boldsymbol{x}| \cdot |\boldsymbol{y}_c|)$$

$$Q_c^{(n)} = \text{quantile}(\{\, d_c(\boldsymbol{x}(u)) : u \in R_c \,\}, n),\ \ n = 10\ \%$$

R_c — надёжные пиксели класса c; 15 = 5 каналов × 3 сезона

- способ 5 не устраняет коллизии: спектрально близкие признаки есть в разметке разных классов (дворы — и деревья, и бетон)
- из надёжных областей остальных классов удаляются пиксели с $d_c(\boldsymbol{x}) < Q_c^{(n)}$ — областей-коллизий не остаётся
- схема совпадает со способом 5 (рис. 7) с точностью до направления операции

Табл. 6. Валидация способа 6 (очистка коллизий) относительно WorldCover: прямая оценка извлечённой выборки и классификация построенной карты при обучении на исходных данных 10 м

Класс	Выборка			Карта 10 м		
	P	R	F_1	P	R	F_1
лесные земли	0,99	0,59	0,74	0,99	0,70	0,82
возделываемые земли	0,97	0,61	0,75	0,98	0,79	0,87
пастбища	0,44	0,63	0,52	0,64	0,59	0,61
водно-болотные угодья	0,94	0,94	0,94	0,88	0,80	0,84
поселения	0,73	0,75	0,74	0,35	0,33	0,34
прочие земли	0,22	0,94	0,36	0,03	0,84	0,06
accuracy			**0,70**			**0,70**
macro avg	0,72	0,74	0,67	0,64	0,67	0,59
weighted avg	0,84	0,70	0,73	0,87	0,70	0,77

- **выборка заметно прореживается;** по итоговой точности способ уступает способу 5

Сравнение способов на тестовом тайле 39UVV

Табл. 7. Сводное сравнение способов относительно WorldCover (тайл 39UVV, обучение на исходных данных 10 м). Левая часть — F_1-score построенной карты по классам; правая — итоговые показатели прямой оценки выборки и классификации карты. Способы отсортированы по убыванию общей точности карты; лучший выделен. Лес — лесные земли, Возд. — возделываемые земли, Паст. — пастбища, ВБУ — водно-болотные угодья, Посел. — поселения, Проч. — прочие земли

Способ	F_1-score карты по классам						Итог: выборка			Итог: карта		
	Лес	Возд.	Паст.	ВБУ	Посел.	Проч.	F_1-мак	F_1-взв	Точн	F_1-мак	F_1-взв	Точн
Надёжный	**0,89**	**0,92**	**0,81**	0,83	0,46	**0,13**	0,68	0,74	0,71	**0,67**	**0,86**	**0,85**
Случайный	0,88	0,90	0,80	0,77	**0,48**	0,05	0,55	0,62	0,58	0,64	0,85	0,82
Эталонный	**0,89**	0,88	0,78	**0,88**	0,46	0,08	**0,72**	**0,79**	**0,75**	0,66	0,84	0,81
Текстурный	0,86	**0,92**	0,78	0,68	0,47	0,05	0,58	0,65	0,61	0,63	0,84	0,81
Очистка эталонного	0,82	0,87	0,61	0,84	0,34	0,06	0,67	0,73	0,70	0,59	0,77	0,70
Однородный	0,85	0,70	0,68	0,78	0,23	0,01	0,61	0,70	0,65	0,54	0,72	0,66

Цветом выделено лучшее значение в каждом столбце

Надёжный — лучший по точности карты (0,85): выбран для картографирования

Эталонный — лучший по прямой оценке выборки, но не по точности карты

Различия ориентировочны: эталон не свободен от ошибок; F_1-макро снижает редкий класс «прочие земли»

Картографирование Самарской области, 2020 г.

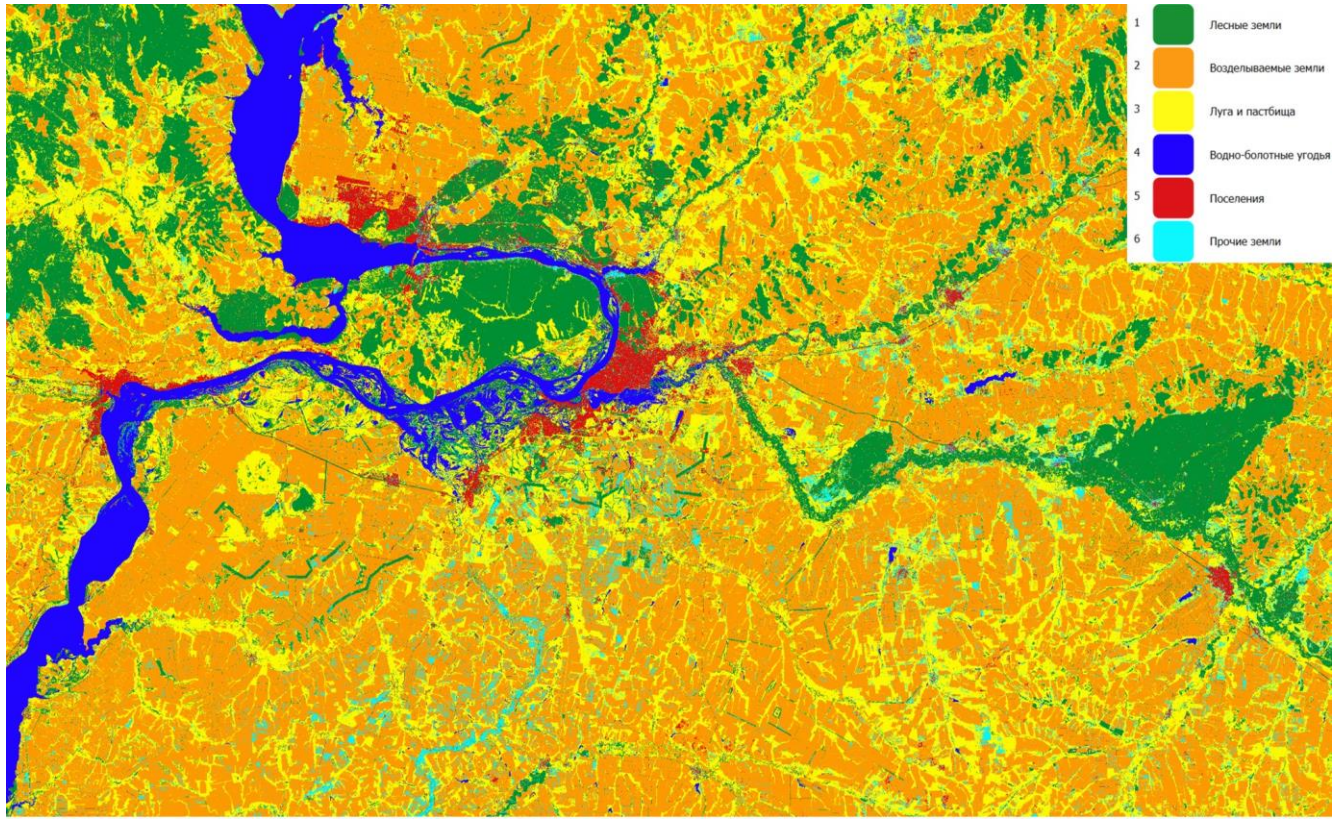


Рис. 8. Карта землепользования Самарской области за 2020 год с пространственным разрешением 10 м, построенная надёжным способом, по всем 15 затрагивающим ее тайлам, без обрезки по границам области

Табл. 8. Валидация итоговой карты землепользования Самарской области (надёжный способ, 15 тайлов, 2020 год) относительно WorldCover при обучении на исходных данных 10 м

Класс	P	R	F_1
лесные земли	0,95	0,84	0,89
возделываемые земли	0,98	0,87	0,92
пастбища	0,76	0,89	0,82
водно-болотные угодья	0,92	0,88	0,90
поселения	0,29	0,72	0,41
прочие земли	0,06	0,21	0,09
accuracy			**0,86**
macro avg	0,66	0,73	0,67
weighted avg	0,90	0,86	**0,88**

- эталонный способ на всей области: точность 0,87 против 0,86 при равном F_1-взв (0,88), но чувствителен к гиперпараметрам и даёт больше ошибок
- **надёжный** — устойчивее при кратно меньшей вычислительной нагрузке: выбран для масштабирования

Не все расхождения с WorldCover — ошибки классификации

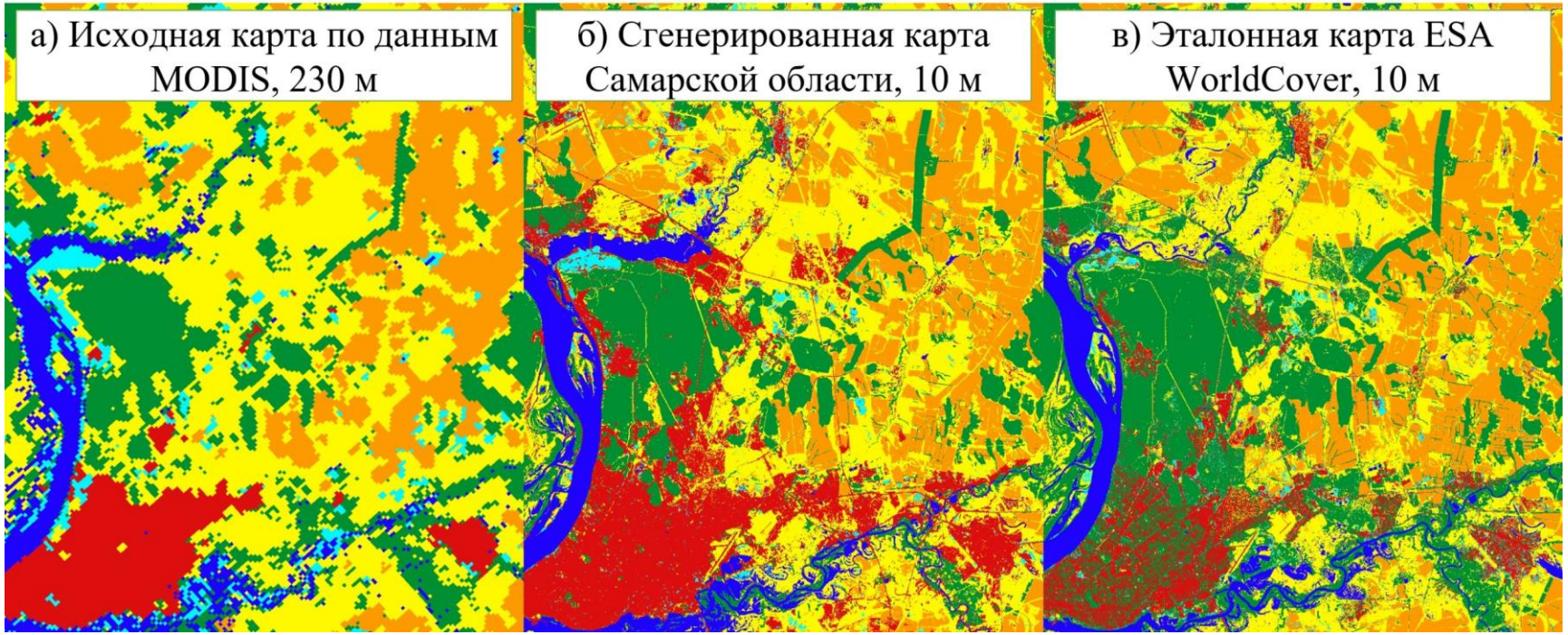


Рис. 9. Сопоставление карт на фрагменте Самарской области: исходная карта по данным MODIS (230 м), построенная карта (надёжный способ, 10 м) и эталонная карта ESA WorldCover (10 м). Часть расхождений между картами отражает не ошибки классификации, а различия в трактовке: например, садовые участки отнесены построенной картой к поселениям, а WorldCover — к лесным землям; аналогичная неоднозначность возникает для водно-болотных угодий в пойме реки

Низкая точность по «поселениям» во многом объясняется трактовкой садовой застройки — **реальная точность карты, по-видимому, выше**

Различия в трактовке

садовые участки, пойма реки: ни одну трактовку нельзя считать ошибочной

«Прочие земли»

редко заполняют целый 230-м пиксель — плохо представлены в исходной карте

Как оценить точнее

экспертная разметка контрольных участков или наземные наблюдения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и перспективы

Результаты

1. Разработан метод повышения разрешения карт землепользования в 23 раза — с 230 до 10 м; ключевой элемент — автоматическое извлечение обучающей выборки
2. Сопоставлены шесть способов извлечения выборки; оптимальный — надёжный: F_1-взв выборки **0,74**, карты тестового тайла — **0,86**
3. Построена карта Самарской области за 2020 год, 10 м: точность **0,86**, F_1-взв **0,88** — консервативная оценка
4. Метод реализован в виде полного цикла обработки — повторяемость результатов без ручной разметки

Перспективы

- Предполагается, что с помощью метода можно регулярно создавать 10 метровые карты, по крайней мере для регионов со сходными условиями
- применимость к будущим картам по данным VIIRS
- наращивание временного измерения признакового пространства
- переход к нейросетевой семантической сегментации
- нужно решить вопросы с качеством эталонных данных, расхождениями на границах тайлов, разделением схожих классов

Спасибо за внимание!

Работа выполнена с помощью инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis.ru/) в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 126031818938-6).

Автор выражает благодарность Колобахину Михаилу Юрьевичу за помощь в подготовке данной работы.

По материалам работы ожидается статья в журнале Компьютерная оптика (Кашницкий А.В., Колобахин М.Ю. Метод повышения пространственного разрешения полученных по данным MODIS карт с использованием данных спутников Sentinel-2 / // Компьютерная оптика. – 20XX. – Т. XX, № X. – <Article ID> – doi: 10.18287/COJ<Article ID>.)