

УДК 504.054:665.7(571.12)(045)

ОЦЕНКА ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕК ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Рязанов С. С.¹, Сабиров А. Т.², Ульданова Р. А.³, Кулагина В. И.⁴

^{1,2,3,4}Академия наук Республики Татарстан, Казань, Российская Федерация

E-mail: RStanislav.soil@gmail.com¹, taset@list.ru², railya.uldanova@mail.ru³, viksoil@mail.ru⁴

Проведена оценка прибрежных территорий крупных и малых рек Предволжья Республики Татарстан по состоянию их подверженности эрозионным процессам. В прибрежной зоне Волги, Свияги и 57 их притоков построена карта залесенности и крутизны склонов. Как эрозионно опасные участки рельефа, приняты территории, расположенные на склонах с крутизной $>3^\circ$ и не защищенных древесной растительностью. С помощью геоинформационных инструментов в пределах границ Республики Татарстан определена общая площадь прибрежной территории подверженной эрозионным процессам. Измерена площадь незащищенной прибрежной зоны реки Свияги. Для малых рек Предволжья Республики Татарстан определена суммарная площадь земель, приуроченных к эрозионно опасным элементам рельефа без защиты древесного покрова.

Keywords: эрозия, Татарстан, Свияга, Волга, малые реки, лесомелиорация.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные водные ресурсы Республики Татарстан характеризуются разветвленной речной сетью. Всего по территории республики протекает 4098 рек, из которых 3686 относятся к малым, чья длина не превышает 10 км. Густота речной сети, в зависимости от региона, составляет 0,11–0,80 км/км² [1]. Крупнейшим водоемом на территории республики является Куйбышевское водохранилище, созданное в бассейне реки Волга. В последние годы наблюдается ухудшение экологического состояния водных объектов и их берегов вследствие интенсивного развития эрозионных процессов и нарушения устойчивости береговых откосов. Около трети берегов Волжского каскада подвержены береговой эрозии [2]. Большая распаханность земель, малая лесистость, высокая расчлененность рельефа создают повышенный потенциал развития эрозионных процессов, нарушают режим формирования стока, приводят к возрастанию загрязнения поверхностных вод [3]. Эрозия берегов рек подвергает риску близко расположенные населенные пункты, инфраструктурные сооружения, угрожает угодьям сельскохозяйственного назначения [4, 5].

Один из эффективных способов защиты ландшафтов от эрозии — создание лесных насаждений на склоновых, овражно-балочных и прибрежных землях. Корни деревьев, распространяясь в радиальном направлении на глубине 2–2,5 м, создают грунтово-корневой слой, характеризующийся повышенной сопротивляемостью сдвиговым и разрывным деформациям грунта [6, 7]. Помимо укрепления берегов рек, древесная растительность в прибрежной зоне также выполняет функции снижения загрязнения, засорения, заиления водных объектов и способствует сохранению среды

обитания водных биологических ресурсов и объектов животного и растительного мира [7].

Цель работы заключалась в определении участков береговой линии рек, требующих проведения защитных мелиоративных мероприятий ввиду высокой подверженности эрозионным процессам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Область обследования. Объектом исследования служили реки, расположенные на территории Предволжья — одном из трех климато-географических регионов Республики Татарстан (рис. 1). Территория Предволжья представляет собой возвышенное плато, сложенное породами верхнепермского возраста, с преобладающими абсолютными отметками порядка 200 м и высокой эрозионной расчлененностью территории. Наибольшие высоты приурочены к водоразделу бассейнов рек Свияга и Сура. Здесь отмечена максимальная абсолютная высота 263,9 м. Междуречье Волги и Свияги несколько ниже — до 235 м. Правый берег Волги представлен относительно крутыми, более 8°, склонами, на ряде участков развиты практически вертикальные уступы. Предволжье характеризуется малой лесистостью (11,3%) и высоким уровнем распаханности. Густота речной сети в данном регионе составляет 0,5–0,7 км/км² [1].

Крупные реки в регионе представлены Волгой и впадающей в нее Свиягой. Из-за их высокой протяженности, анализ их береговых зон проведен в пределах выделенных географических районов.

Волга. Нынешнее строение долины Средней Волги сложилось после создания Куйбышевского водохранилища в 1957 г. [8]. Протяженность реки в пределах Республики Татарстан составляет 177 км [9]. Вдоль береговой линии Волги выделено 6 примерно одинаковых по протяженности прибрежных географических района (рис. 1):

1 — от границы Чувашской Республики до с. Пустые Моркваши. Северная часть Предволжья с доминирующим низинным рельефом. В речных бассейнах преобладают небольшие абсолютные высоты до 60 м;

2 — от с. Пустые Моркваши до с. Красновидово Камско-Устьинского района. Северная и северо-восточная часть Предволжья с высоким правым берегом р. Волги и абсолютными высотами до 180–210 м;

3 — от с. Красновидово до п.г.т. Камское Устье. Зона охватывает восточную часть Предволжья с высоким правым берегом. Крутизна склонов превышает 8°, встречается большое количество практически вертикальных уступов [10];

4 — от п.г.т. Камское Устье до д. Долгая Поляна. Восточная часть Предволжья с низким и средним правым берегом р. Волга;

5 — от д. Долгая Поляна до с. Урюм. Юго-восточная часть Предволжья с высоким берегом, высокой лесистостью, и, как следствие, меньшей интенсивностью эрозионных процессов;

6 — от с. Урюм до границы Ульяновской области. Южная часть Предволжья с высоким правым берегом р. Волга, и также высокой лесистостью.

ОЦЕНКА ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕК ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

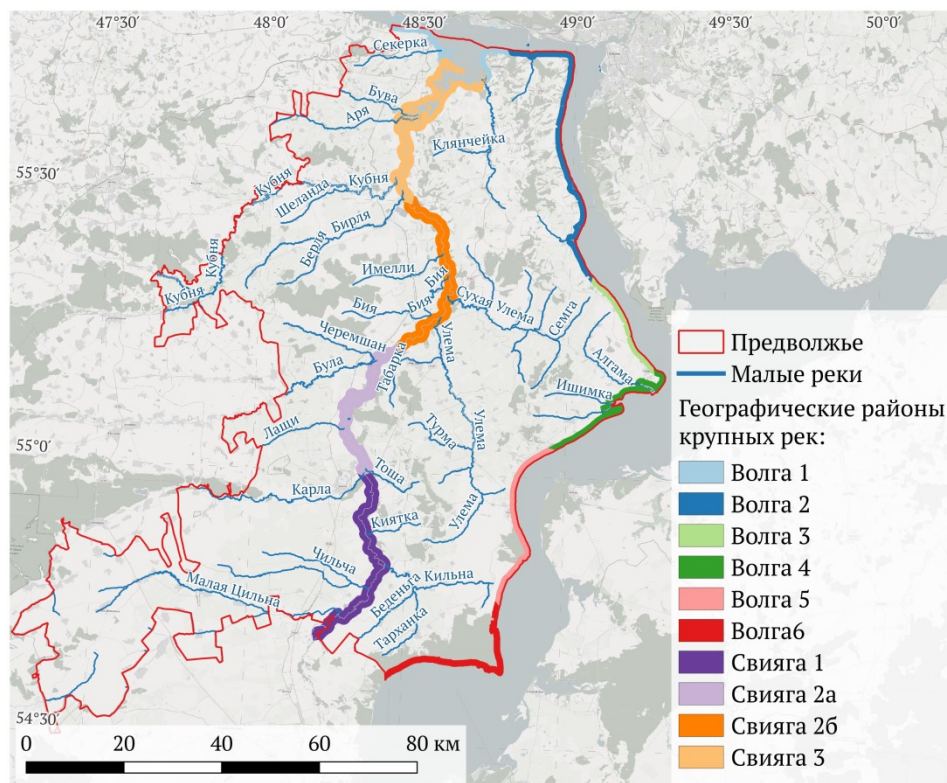


Рис. 1. Территория обследования и географические районы рек Свияга и Волга.

Свияга. Протяженность в пределах района исследования — 206 км. Правобережная полоса, представляющая собой междуречье реки Свияги с Волгой, узкая (10–15 км) и высокая (до 235–238 м). Склон, обращенный к Свияге, пологий и длинный, а склон, обращенный к Волге, короткий и крутой. Левобережье более широкое (около 100 км), низкое. Береговая зона реки также поделена на 4 географических района (рис. 1):

1 — от южной границы РТ с Ульяновской областью до г. Буинск. Зона расположена в южной части Предволжья с волнистым рельефом с высокой лесистостью прибрежной территории и меньшей интенсивностью эрозионных процессов;

2а — от г. Буинск до с. Свияжский. Центральная часть Предволжья, характеризуется левой асимметрией русла реки;

2б — от с. Свияжский до с. Бурундуки. Центральная часть Предволжья, характеризуется правой асимметрией русла реки;

3 — от с. Бурундуки до устья. Северная часть Предволжья с доминирующим низинным рельефом.

Малые реки. В работе изучены 57 малых рек Предволжья, имеющих официально закрепленное название (рис. 1). Все изученные реки являются притоками Свияги или непосредственно Волги — основных речных дрен Предволжья. Общая

протяженность обследованных рек в пределах Республики Татарстан составляет 1385.7 км.

Определение эрозионно-опасных участков. Определение участков береговой линии рек, требующих проведения защитных мелиоративных мероприятий ввиду высокой опасности развития эрозионных процессов, проводилось согласно следующему алгоритму:

1. Построение карты крутизны склонов на территорию обследования. За основу при расчете крутизны склонов использована цифровая модель высот ALOS World 3D — глобальная модель поверхности/высот, построенная при помощи панхроматического прибора дистанционного зондирования для стереокартографии (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping, PRISM) на борту спутника Advanced Land Observing Satellite (ALOS) [11]. Открытая некоммерческая версия, использованная в работе, имеет разрешение в 1 угловую секунду (примерно 30 м). Глобальная вертикальная точность данной модели оценивается в 3,7–5,7 м [12]. Итоговая карта крутизны склонов Предволжья Республики Татарстан представлена на рисунке 2.

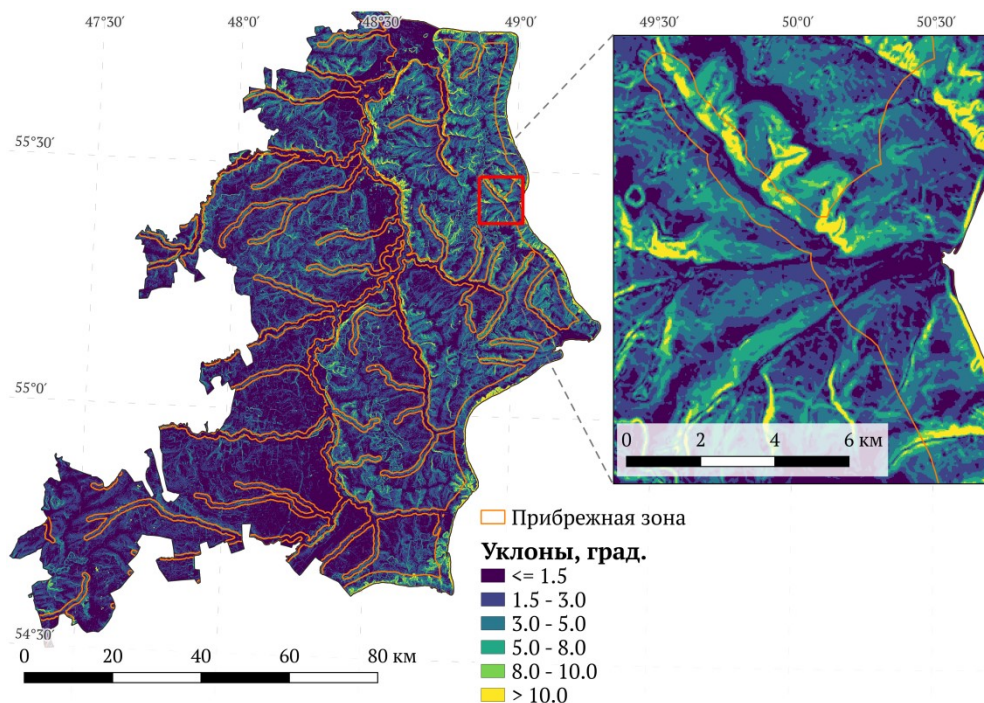


Рис. 2. Карта крутизны склонов территории Предволжья Республики Татарстан и увеличенный фрагмент.

2. Построение карты древесной растительности на территории Предволжья Республики Татарстан. Подробно методика выделения древесной растительности описана ниже в разделе «Выделение залесенных участков».

ОЦЕНКА ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕК ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

3. Анализ эрозионной опасности проведен в пределах выделенной прибрежной территории (рис. 2). Статья 65 Водного кодекса РФ устанавливает размеры водоохранной зоны, в пределах которой вводятся ограничения хозяйственной и иной деятельности, а также устанавливаются прибрежные защитные полосы, в 50–200 м в зависимости от протяженности реки. С учетом прилегающих эродированных территорий и овражных систем, данная ширина лесополос не обеспечивает достаточную кольматирующую способность. В данной работе ширина прибрежных территорий принята в 500 м для малых рек и р. Свияги, и в 2500 м для р. Волга [13]. Для малых и крупных рек проведен расчет следующих показателей: протяженность реки; площадь выделенной прибрежной зоны; суммарная площадь эрозионно-опасных территорий – все территории с крутизной склонов $>3^\circ$; площадь территорий, нуждающихся в защитных мелиоративных мероприятиях — эрозионно-опасные земли, не занятые древесной растительностью.

В качестве эрозионно-опасных, приняты земли, расположенные на участках с крутизной $>3^\circ$. По классификации А. С. Козменко, данные земли относятся к присетевому земельному фонду, примыкающему к гидрографической сети со средне- и сильносмытыми почвами, нуждающимися в лесомелиоративных мероприятиях [14]. По более дробной классификации С. С. Соболева выделенные земли относятся к классу “А” — пригодные для интенсивного использования при проведении специальных агротехнических противоэрозионных мероприятий [14]. В. В. Топтыгин [15] относит выделенные земли к 3 категории, подверженной водной эрозии, и более опасным при повышении длины линии стока и крутизны склонов.

Итоговый расчет эрозионной опасности земель в границах выделенных прибрежных зон проведет путем совмещения растровых карт крутизны склонов и типов земного покрова при помощи растрового калькулятора и последующим расчетом площадей в пределах полигонального векторного слоя прибрежных зон.

Выделение залесенных участков. Для выделения на территории Предволжья Республики Татарстан участков, занятых древесной растительностью, была проведена классификация мультиспектральных данных дистанционного зондирования по типам земного покрова/землепользования (Land Use/ Land Cover, LULC).

Для охвата всей территории Предволжья загружено 5 сцен мультиспектрального спутника Sentinel-2 за временной период 08 июля 2020 г. — 05 августа 2020 г. Продукты данного спутника характеризуются высоким пространственным (10–60 м для отдельных спектральных каналов) и временным (5 дней) разрешением [16]. Все загруженные снимки относились к летнему сезону и характеризовались общей облачностью $< 10\%$.

В работе использованы 11 спектральных каналов снимков Sentinel-2 (табл. 1). Этапы предварительной обработки снимков включали: (1) приведение к единому пространственному разрешению — 10 м; (2) перевод цифровых значений снимков в значения отражательной способности земной поверхности (bottom of atmosphere reflectance) [16]; (3) расчет вегетационного индекса NDVI (normalized difference vegetation index) согласно формуле [17]:

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)}, \quad (1)$$

где: NIR — значения отражательной способности в инфракрасном спектре (спектральный канал Band 8 в случае Sentinel-2); RED — значения отражательной способности в красном спектре (спектральный канал Band 4 в случае Sentinel-2).

Таблица 1.

Спектральные слои снимков Sentinel-2

| Спектральный слой | Длина волны, μm | Пространственное разрешение, m |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Band 2–Blue | 0,490 | 10 |
| Band 3–Green | 0,560 | 10 |
| Band 4–Red | 0,665 | 10 |
| Band 5–Vegetation Red Edge | 0,705 | 20 |
| Band 6–Vegetation Red Edge | 0,740 | 20 |
| Band 7–Vegetation Red Edge | 0,783 | 20 |
| Band 8–NIR | 0,842 | 10 |
| Band 8A–Vegetation Red Edge | 0,865 | 20 |
| Band 10–SWIR - Cirrus | 1,375 | 60 |
| Band 11–SWIR | 1,610 | 20 |
| Band 12–SWIR | 2,190 | 20 |

Непосредственно классификация типов земного покрова проведена при помощи метода *random forest* [18]. Метод основан на принципе бэггинга — построении ансамбля независимых деревьев классификации, где каждое дерево обучено на подвыборке из исходного набора данных и случайном наборе предикторов. Данный метод хорошо подходит для моделирования с большим количеством коррелированных предикторов. Недостатком метода является низкая интерпретируемость зависимостей между предикторами и зависимой переменной, что в случае задач картирования земного покрова не играет значительной роли [19].

Для обучения модели классификации случайным образом создан набор тренировочных точек (всего 626 точек), для которых экспертным путем определялся тип земного покрова: (1) древесная растительность, включая лиственные и хвойные породы; (2) травянистая растительность; (3) открытый почвенный покров; (4) водная поверхность; (5) урбанизированная территория (Рис. 3). Далее, для точек извлекались значения отражательной способности по всем спектральным каналам и рассчитанному индексу NDVI, проводилось построение модели классификации и прогноз типов земного покрова на всю территорию Предволжья.

Обработка цифровой модели рельефа и расчет геоморфологических параметров проведен в геоинформационной системе SAGA [20]. Классификация типов земного покрова методом *random forest* проведена при помощи пакета «*randomForest*» для статистической среды R [18, 21]. Итоговое оформление картографического материала проведено в геоинформационной системе QGIS [22].

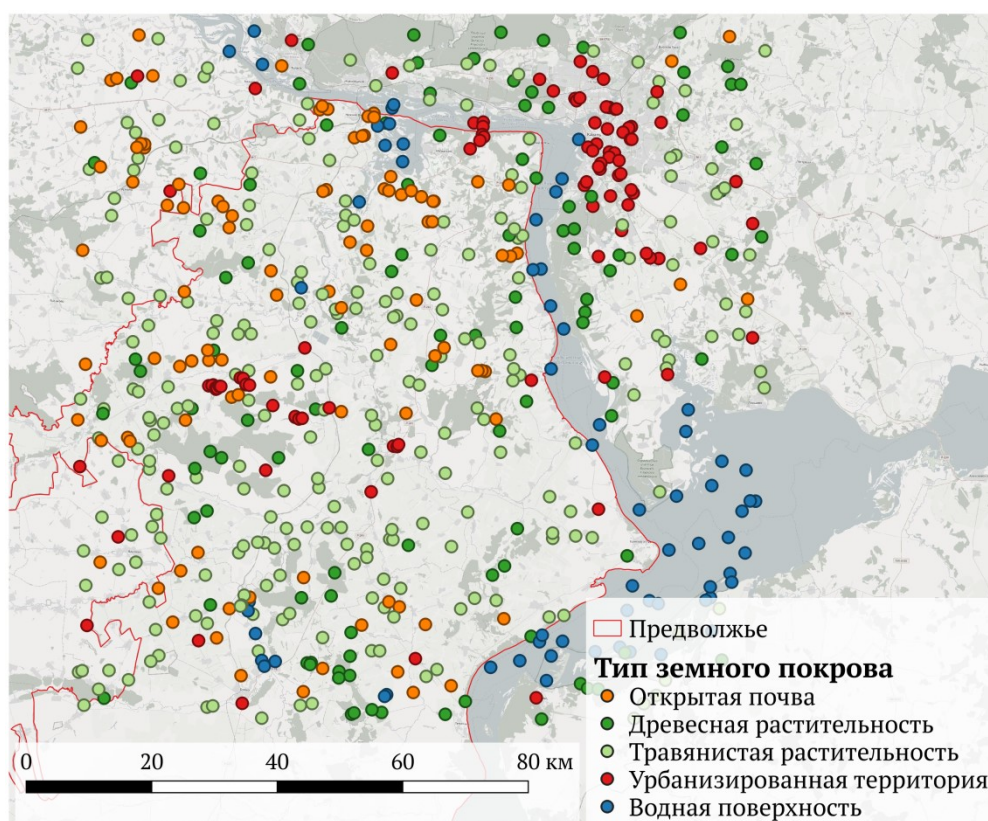


Рис. 3. Расположение точек обучения модели классификации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Итоги классификации типов земного покрова. Для выделения территорий, занятых древесной растительностью, проведена классификация типов земного покрова/землепользования на основе мультиспектральных спутниковых снимков Sentinel-2. В результате классификации выделено 5 типов земного покрова: водная поверхность, травянистая растительность, древесная растительность, открытый почвенный покров и застроенная урбанизированная территория. На рисунке 4 представлен график спектральных сигнатур выделенных классов, отображающий изменение спектральной отражательной способности в зависимости от длины волны.

Для проведения классификации использован метод random forest. В таблице 2 представлена матрица ошибок модели классификации. Согласно результатам, общая точность модели составила 88,5%, Cohen's kappa = 0.84, что говорит о высокой согласованности прогнозных значений с реальными типами земного покрова, определенными экспертным путем [23]. Среди выделенных типов земного покрова, наибольшей погрешностью характеризуется класс открытого почвенного покрова — 21,1%, что объясняется как схожестью спектральной сигнатуры данного класса с

урбанизированными поверхностями (рис. 4), а также неоднозначностью дифференциации с классом травянистой растительности при ее разреженности. Для класса древесной растительности точность составила 88,9%, 12,1% тренировочных точек классифицированы как травянистая растительность.

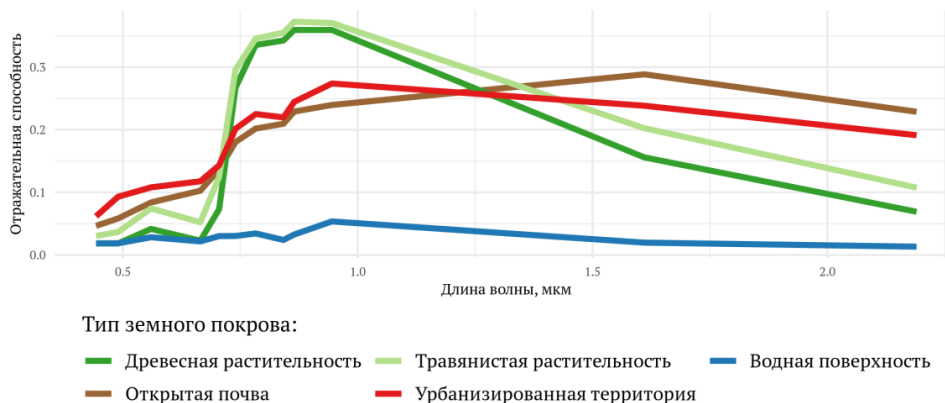


Рис. 4. Расположение точек обучения модели классификации.

Таблица 2.

Матрица ошибок модели классификации типов земного покрова

| Классы | | Прогнозные классы | | | | | |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|--------------------|------------------|
| | | Открытая почва | Деревянная растительность | Травянистая растительность | Урбанизированная | Водная поверхность | Ошибка класса, % |
| Реальные классы | Открытая почва | 82 | 1 | 14 | 7 | 0 | 21,1 |
| | Деревянная растительность | 0 | 92 | 15 | 0 | 0 | 14,0 |
| | Травянистая растительность | 7 | 7 | 231 | 1 | 1 | 6,5 |
| | Урбанизированная территория | 11 | 1 | 4 | 85 | 1 | 16,7 |
| | Водная поверхность | 0 | 2 | 0 | 0 | 64 | 3,0 |

ОЦЕНКА ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕК ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Итогом классификации стала карта типов земного покрова Предволжья Республики Татарстан по состоянию на 2020 г. (рис. 5, а) из которой в дальнейшем выделены зоны, занятые исключительно древесной растительностью (рис. 5, б).

Эрозионно-опасные участки малых рек. Участки береговой зоны рек, занятые древесной растительностью, даже расположенные на склонах с крутизной $>3^\circ$ приняты как защищенные от интенсивных проявлений водной эрозии [3]. Как эрозионно-опасные участки, требующие закрепления грунта путем проведения мелиоративных лесопосадочных работ, приняты открытые участки прибрежной 500 м области, расположенные на крутых, $>3^\circ$, склонах. Итоги выделения этих зон представлены на рис. 6.

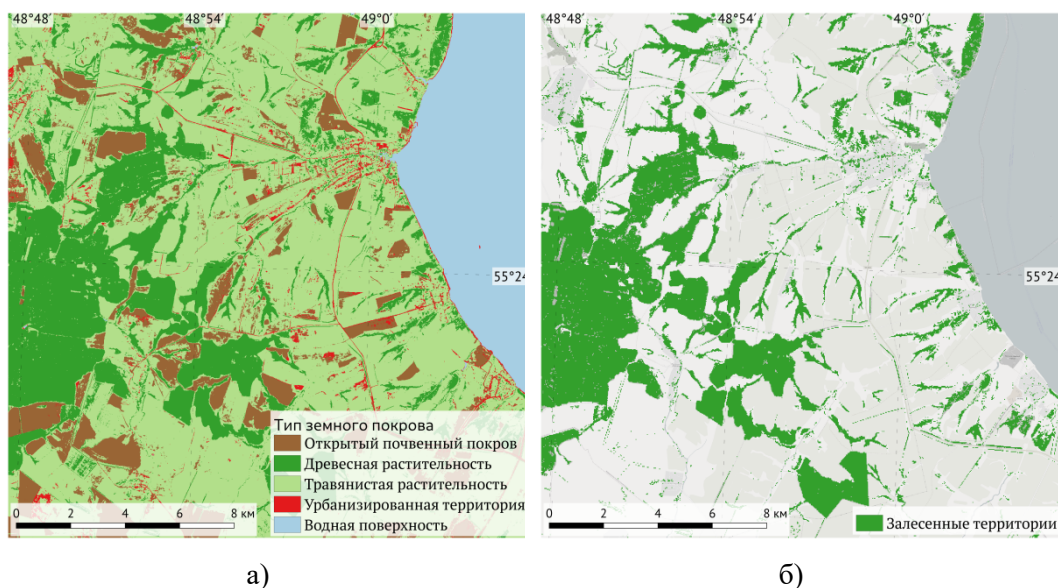


Рис. 5. Классификация типов земного покрова (а) и территории, занятые древесной растительностью (б).

Характеристики малых рек Предволжья РТ, их прибрежных зон и результаты определения эрозионной опасности представлены в табл. 3. Для малых рек Предволжья РТ суммарная площадь прибрежной зоны составляет 125.9 тыс. га, из которых 30.2 тыс. га расположено на участках рельефа с высокой крутизной склонов ($>3^\circ$). В пределах прибрежной зоны малых рек Предволжья площадь залесенных территорий составляет 9.5 тыс. га, а суммарная площадь земель, приуроченных к эрозионно-опасным элементам рельефа без защиты древесного покрова составляет 26.6 тыс. га.

Эрозионно-опасные участки крупных рек.

Результаты определения эрозионно-опасных участков в прибрежной зоне рек Свияга и Волга представлены в табл. 4. Результаты анализа показывают, что суммарная площадь прибрежной зоны р. Волга на территории Предволжья РТ

составляет 65.0 тыс. га, из которых к эрозионно-опасным относится 31.7 тыс. га. Площадь залесенной территории в пределах 2500 м прибрежной зоны составляет 20.9 тыс. га. Итоговая площадь территории без древесного покрова и с уклонами поверхности $>3^\circ$ составляет 17.8 тыс. га.

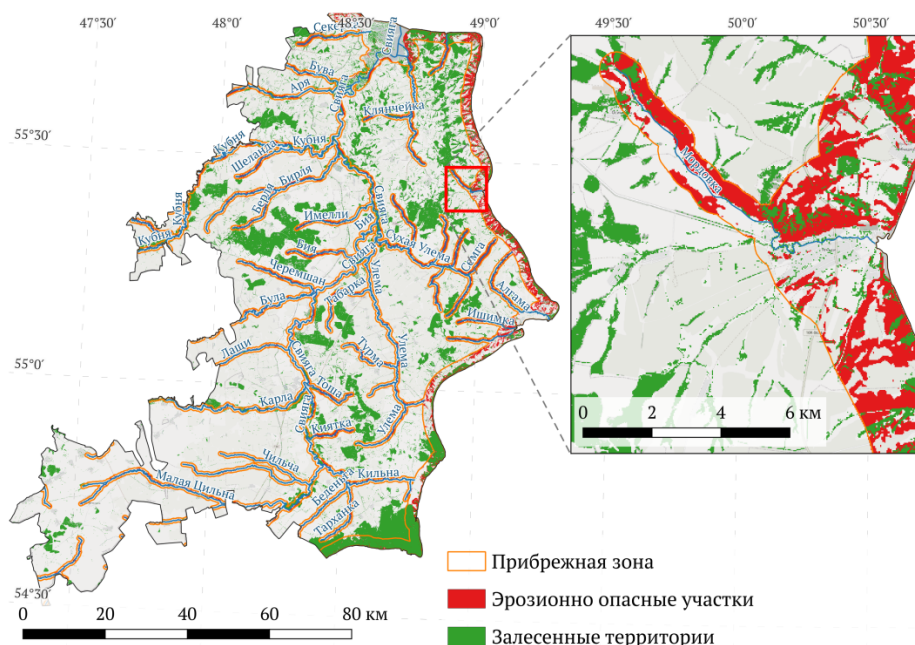


Рис. 6. Эрозионно-опасные участки прибрежной территории рек Предволжья и увеличенный фрагмент карты.

Таблица 3.

Параметры малых рек и оценка эрозионно-опасных территорий

| Название | Длина реки, м | Площадь, га | | | |
|----------|---------------|-------------|------------|-----------------------|---------------------------|
| | | Прибр. тер. | Залесенная | С уклоном $> 3^\circ$ | Эрозионно-опасные участки |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Алгاما | 34406,2 | 3171,9 | 162,2 | 852,2 | 799,5 |
| Аль | 1938,8 | 268,9 | 12,1 | 28,1 | 27,8 |
| Аря | 31273,6 | 3017,1 | 516,4 | 528,8 | 428,2 |
| Беденьга | 20242,5 | 1861,2 | 62,9 | 160,8 | 149,1 |
| Бездна | 7783,9 | 839,7 | 12,9 | 24,1 | 23,7 |

**ОЦЕНКА ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ
ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕК ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Продление таблицы 3.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Берля | 20167,2 | 1944,2 | 228,9 | 615,7 | 531,7 |
| Бирля | 58403,7 | 4892,8 | 309,5 | 1157,1 | 1086,2 |
| Бисярка | 9645,5 | 900,0 | 11,6 | 165,7 | 159,0 |
| Бия | 37688,6 | 3544,7 | 173,1 | 968,0 | 900,0 |
| Большая Тельца | 35998,2 | 3399,4 | 43,1 | 246,4 | 240,7 |
| Большая Якла | 32616,8 | 2960,0 | 22,7 | 491,7 | 488,5 |
| Большие Карлы | 20828,6 | 2098,3 | 98,4 | 247,1 | 198,3 |
| Большой Шак-Ян | 7171,9 | 708,4 | 40,9 | 131,5 | 126,6 |
| Бува | 21008,8 | 2065,2 | 383,1 | 324,5 | 279,2 |
| Бугурна | 2002,3 | 263,4 | 3,4 | 32,7 | 32,6 |
| Була | 32663,1 | 2694,3 | 26,2 | 335,0 | 331,4 |
| Елга | 5509,8 | 610,4 | 0,4 | 140,2 | 140,2 |
| Имелли | 25116,7 | 2367,9 | 193,9 | 664,3 | 561,2 |
| Инеш | 1227,5 | 194,5 | 14,8 | 23,7 | 21,0 |
| Иныш | 759,2 | 128,2 | 0,8 | 3,6 | 3,6 |
| Ишимка | 16689,9 | 1631,2 | 77,6 | 804,4 | 763,1 |
| Карла | 73388,7 | 6479,6 | 1517,4 | 1235,0 | 588,6 |
| Кильна | 39661,5 | 3417,9 | 82,5 | 518,1 | 496,5 |
| Киярметь | 14836,7 | 1529,3 | 70,8 | 811,6 | 770,2 |
| Киятка | 15365,4 | 1440,2 | 159,9 | 750,9 | 695,1 |
| Клянчейка | 15327,8 | 1444,2 | 250,7 | 680,0 | 515,4 |
| Кубня | 121478, 1 | 9100,0 | 1058,0 | 1479,5 | 1028,8 |
| Лащи | 24181,9 | 2290,6 | 40,6 | 295,5 | 290,6 |
| Любимовка | 5588,1 | 618,0 | 34,6 | 128,3 | 123,9 |
| Малая Цильна | 60728,5 | 5370,8 | 67,5 | 956,6 | 942,1 |
| Малый Шак-Ян | 10636,4 | 959,2 | 16,7 | 383,1 | 376,4 |
| Меминка | 17926,3 | 1741,0 | 85,5 | 832,6 | 790,4 |
| Мордовка | 11598,3 | 1154,8 | 130,8 | 527,6 | 449,9 |
| Мордовская | 19287,5 | 1874,0 | 221,4 | 827,0 | 728,6 |
| Морквашинка | 13148,3 | 1292,1 | 388,9 | 879,6 | 561,8 |
| Мусирма | 4716,2 | 499,8 | 39,4 | 224,6 | 207,1 |
| Пакерлы | 6298,4 | 699,5 | 72,8 | 85,9 | 73,7 |
| Пушсирма | 4537,5 | 527,3 | 31,6 | 135,2 | 115,0 |
| Руссалимка | 8544,9 | 904,3 | 4,8 | 94,6 | 92,9 |

Продление таблицы 3.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|---------|--------|-------|--------|--------|
| Сарауль | 12602,8 | 1209,9 | 74,0 | 753,6 | 704,2 |
| Секерка | 21549,0 | 2108,0 | 279,8 | 878,6 | 790,2 |
| Семга | 13962,2 | 1353,1 | 73,6 | 914,8 | 872,2 |
| Сугутка | 21711,9 | 2025,6 | 131,0 | 757,1 | 691,1 |
| Сулица | 46735,9 | 4289,6 | 504,9 | 1066,4 | 874,0 |
| Сухая Улема | 50305,4 | 4514,6 | 419,7 | 1373,7 | 1182,8 |
| Табарка | 23002,0 | 2139,2 | 37,4 | 578,1 | 572,8 |
| Тарханка | 23594,8 | 1967,9 | 183,4 | 437,2 | 354,9 |
| Тоша | 19597,9 | 1593,4 | 130,0 | 684,6 | 610,5 |
| Турма | 22142,6 | 1876,3 | 41,6 | 519,3 | 506,3 |
| Улема | 75421,5 | 6714,0 | 331,7 | 1042,3 | 979,8 |
| Урюм | 23102,0 | 1903,5 | 127,9 | 475,1 | 437,2 |
| Урюмка | 5987,2 | 632,7 | 21,8 | 44,4 | 43,5 |
| Хрустальная река | 6868,6 | 626,8 | 59,7 | 43,8 | 41,7 |
| Цильна | 52725,3 | 5072,8 | 152,9 | 400,6 | 359,8 |
| Черемшан | 28504,5 | 2498,6 | 82,2 | 759,1 | 737,3 |
| Чильча | 27899,7 | 2679,8 | 61,0 | 183,9 | 165,7 |
| Шеланда | 19573,6 | 1839,7 | 92,1 | 549,1 | 528,2 |

Таблица 4.

Параметры крупных рек и оценка эрозионно-опасных территорий

| Участок | Длина участка, м | Площадь, га | | | |
|-------------|------------------|-------------|------------|----------------|---------------------------|
| | | Прибр. тер. | Залесенная | С уклоном > 3° | Эрозионно-опасные участки |
| Волга (1) | 59766,3 | 10165,5 | 2827,4 | 3506,5 | 1980,4 |
| Волга (2) | 71848,1 | 17231,7 | 3590,4 | 9927,9 | 7199,9 |
| Волга (3) | 23694,2 | 6888,2 | 1163,4 | 4122,0 | 3086,3 |
| Волга (4) | 56577,1 | 9956,9 | 1468,0 | 3693,1 | 2685,8 |
| Волга (5) | 36908,2 | 10398,6 | 3552,8 | 4454,3 | 1948,0 |
| Волга (6) | 45366,1 | 10379,1 | 8362,8 | 5963,1 | 862,1 |
| Свияга (1) | 69322,9 | 4979,2 | 1113,9 | 1077,0 | 679,2 |
| Свияга (2а) | 43875,6 | 4187,0 | 238,0 | 630,7 | 497,5 |
| Свияга (2б) | 49753,7 | 4738,6 | 1170,9 | 1023,4 | 646,0 |
| Свияга (3) | 47874,9 | 6624,7 | 1753,5 | 1483,2 | 1091,1 |

ОЦЕНКА ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕК ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Площадь прибрежной зоны р. Свияга составляет 20,5 тыс. га. К участкам с потенциально высокой эрозионной опасностью относится 4,2 тыс. га. Площадь залесенной береговой линии в пределах прибрежной зоны составляет 4,3 тыс. га. Итоговая площадь, требующая защитных мелиоративных мероприятий — 2,9 тыс. га.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделение эрозионно-опасных участков прибрежной территории рек Предволжья Республики Татарстан проведено на основе комплексного анализа геоморфометрических и мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли. На правом берегу р. Волга в пределах границ Республики Татарстан общая площадь выделенной прибрежной территории составляет 65,0 тыс. га. Четвертый и первый районы р. Волга наименее подвержены водной эрозии — площадь земель с высокой крутизной склонов ($> 3^\circ$) составляет 37,1 % и 34,5 % от общей площади прибрежной территории, соответственно. Высокой потенциальной эрозионной опасностью характеризуются второй (57,6 % от прибрежной территории), третий (59,8 %), пятый (42,8 %) и шестой (57,5 %) районы. С учетом площади земель, в настоящее время защищенных древесным покровом, районы р. Волга располагаются в следующем порядке по площади прибрежной территории, нуждающейся в мелиоративных мероприятиях: Волга 6 (8,3 % от прибрежной территории) < Волга 5 (18,7 %) < Волга 1 (19,5 %) < Волга 4 (27,0 %) < Волга 2 (41,8 %) < Волга 3 (44,8 %).

Площадь прибрежной территории р. Свияга в пределах Предволжья Республики Татарстан составляет 20,5 тыс. га. Районы р. Свияга слабо различаются по относительной площади земель с высокой крутизной склонов ($> 3^\circ$): Свияга 1 — 21,6% от площади прибрежной территории; Свияга 2а — 15,1%; Свияга 2б — 21,6 %; Свияга 3 — 22,4%. Залесенность прибрежной территории также низкая — для района Свияга 2а площадь прибрежной территории, занятой древесной растительностью составляет 5,7 %, для остальных районов залесенность составляет 22–26%. Площадь незащищенных земель с высокой эрозионной опасностью слабо различается между верхним и средним течением р. Свияга (13,6%, 11,9% и 13,6% для районов 1, 2а и 2б, соответственно) и возрастает в нижнем течении — 16,5% для района 3.

На территории Предволжья Республики Татарстан проведен анализ 57 малых рек с общей протяженностью 1,4 тыс. км. Общая площадь прибрежных территорий составляет 126 тыс. га. Наиболее сильно водной эрозии подвержены прибрежные территории рек Морквашинка (68,1% земель с уклоном $>3^\circ$), Семга (67,6%), Сарауль (62,3%), Киярметь (53,1%), Киятка (52,1%). Средняя залесенность прибрежной территории малых рек составляет 6,8%, с минимальным значением у р. Елга (0,1%) и максимальным у р. Морквашинка (30,1%). Площадь незащищенной территории с высоким потенциалом водной эрозии в среднем составляет 23,4%. Наибольшая относительная площадь территорий, нуждающихся в мелиоративных мероприятиях ($>40\%$) выявлена для рек Семга, Сарауль, Киярметь, Киятка, Ишимка, Меминка, Морквашинка, Мусирма.

Список литературы

1. Государственный доклад. О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году. / ред. А. В. Шадриков, А. М. Шигапов. Казань: Министерство экологии и природных ресурсов Республики Татарстан, 2021. 402 с.
2. Остякова А. В. Инженерно-экологическая оценка береговых процессов на водных объектах (на примере Угличского водохранилища) // Вестник МГСУ. 2017. № 10. С. 1163-1171.
3. Тыщук Г. Ф., Денегина Н. В. Закрепление слабых берегов малых рек, оврагов и балок // Вестник Мордовского университета. 2008. Т. 4. С. 178–182.
4. Воробьев А. Ю., Пузаков С. В. Динамика боковой эрозии на вогнутых берегах излучин реки Оки в ее среднем течении в XIX-XX веках и на современном этапе // Вестник Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина. 2020. Т. 3. С. 27–46. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-3-27-46.
5. Падалко Ю. А., Чибилев А. А. Проблемы развития русловых процессов в бассейне р. Урал // Доклады академии наук. 2017. Т. 475. № 6. С. 702–705. DOI: 10.7868/S0869565217240215.
6. Зубаиров Р. Р., Рыжков И. Б., Мустафин Р. Ф., Раянова А. Р. Устойчивость ландшафтных катен водосбора рек // Природообустройство. 2018. Т. 3. С. 73–80. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-3-73-80.
7. Мустафин Р. Ф., Рахматуллин З. З., Раянова А. Р. Древесно-кустарниковая растительность при оценке устойчивости берегов рек // Природообустройство. 2016. Т. 5. С. 108–114.
8. Экологические системы островов Куйбышевского водохранилища. Казанский район переменного подпора / ред. В.А. Бойко, Б. Р. Григорьян, Д. В. Иванов, В. Г. Ивлиев. Казань: изд-во «Фэн», 2002. 360 с.
9. Атлас Республики Татарстан / ред. Б.Г. Петров. Санкт-Петербург: ОАО «Иван Федоров», 2005. 216 с.
10. Ермолаев О. П., Игонин М. Е., Бубнов А. Ю., Павлова С.В. Ландшафты Республики Татарстан: в 12 т.. Т. 2 / ред. О.П. Ермолаев. Казань: Слово, 2007. 411 с.
11. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2014. Vol. II-4. P. 71–76. DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
12. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models // IJGI. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 114. DOI: 10.3390/ijgi7030114.
13. Ульданова Р. А., Сабиров А. Т. Продуктивность дубовых насаждений прибрежных территорий реки Волги // Российский журнал прикладной экологии. 2021. № 3(27). С. 11–22. DOI: 10.24852/2411-7374.2021.3.11.22
14. Кузнецов М. С., Глазунов Г. П. Эрозия и охрана почв: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1996. 335 с.
15. Топтыгин В. В. Организация территории пашни в условиях водной эрозии почв. Методические указания. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2018. 94 с.
16. Sentinel-2 User Handbook [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xslst4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook. (дата обращения 25.01.2022).
17. Kobayashi N., Tani H., Wang X., Sonobe R. Crop classification using spectral indices derived from Sentinel-2A imagery // Journal of Information and Telecommunication. 2020. Vol. 4. No. 1. P. 67–90. DOI: 10.1080/24751839.2019.1694765.
18. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
19. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning : Springer Texts in Statistics. New York, NY: Springer New York, 2013. 426 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7138-7. ISBN: 978-1-4614-7137-0.
20. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. // Geosci. Model Dev. 2015. Vol. 8. P. 1991-2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.

ОЦЕНКА ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕСНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ РЕК ПРЕДВОЛЖЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

21. R Core Team. A language and environment for statistical computing [Электронный ресурс]. 2020. Режим доступа: <https://www.R-project.org/>. (дата обращения 25.01.2022).
22. QGIS Association. QGIS Geographic Information System [Электронный ресурс]. 2021. Режим доступа: <http://www.qgis.org/>. (дата обращения 25.01.2022).
23. Ben-David A. About the relationship between ROC curves and Cohen's kappa // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2008. Vol. 21. No. 6. P. 874-882. DOI: 10.1016/j.engappai.2007.09.009.

EVALUATION OF ANTI-EROSION PROTECTION BY FOREST PLANTS OF THE COASTAL TERRITORY OF THE PREDVOLJIE RIVERS OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

Ryazanov S. S.¹, Sabirov A. T.², Uldanova R. A.³, Kulagina V. I.⁴

^{1,2,3,4}Tatarstan Academy of Sciences», Kazan, Russian Federation

E-mail: RStanislav.soil@gmail.com¹, tasat@list.ru², railya.uldanova@mail.ru³, viksoil@mail.ru⁴

Deterioration of ecological state of water bodies and their banks due to development of erosion processes, reduction of forest cover and disturbance of bank slopes leads to subsequent deterioration of flow formation regime, increasing of surface waters pollution, putting of nearby settlements and agricultural lands at risk. Creation of forest plantations on slopes, gully and coastal lands is an effective way to protect landscapes from erosion.

The aim of the work was to determine the river shoreline areas of the Predvoljje rivers of the Republic of Tatarstan, subjected to erosion processes and requiring protective reclamation measures.

The object of the study was large rivers Sviyaga and Volga, as well as 57 small rivers with an official name. Identification of erosion hazardous areas was carried out according to the algorithm: (1) construction of slope steepness map based on the ALOS World 3D digital elevation model; (2) construction of forest vegetation map for the survey area using random forest classification of land cover types based on the Sentinel-2 multispectral satellite images; (3) identification of erosion hazardous areas within the coastal zone (500 m buffer) — territories located on slopes with steepness $>3^\circ$ and not protected by tree vegetation.

The classification model trained on 626 points showed an overall accuracy of 88,5% and Cohen's kappa = 0,84. Five land cover types were identified. Plots occupied by woody vegetation were further used as a mask to determine the erosion hazard of the coastal zones. For small rivers of the Predvoljje the total area of the buffer coastal zone was 124,9 thousand ha, from which 30.2 thousand ha were located on slopes with steepness $>3^\circ$. The area of erosion-prone territories, requiring protective afforestation works was 26,6 thousand ha. For large rivers Volga and Sviyaga the area of coastal zones amounted 65,0 and 20,5 thousand ha, respectively, of which 17,8 and 2,9 thousand ha are unprotected.

Keywords: erosion, Tatarstan, Sviyaga, Volga, small rivers, forest melioration.

References

1. Gosudarstvennyj doklad. O sostoyanii prirodnyh resursov i ob ohrane okruzhayushchej sredy Respubliki Tatarstan v 2020 godu. / red. A. V. SHadrikov, A. M. SHigapov. Kazan': Ministerstvo ekologii i prirodnyh resursov Respubliki Tatarstan, 2021. 402 s.

2. Ostyakova A. V. Inzhenerno-ekologicheskaya ocenka beregovykh processov na vodnykh ob"ektakh (na primere Uglichskogo vodohranilishcha) // Vestnik MGSU. 2017. № 10. S. 1163–1171.
3. Tyshchuk G. F., Denega N. V. Zakreplenie slabyykh beregov malyykh rek, ovragov i balok // Vestnik Mordovskogo universiteta. 2008. T. 4. S. 178–182.
4. Vorob'ev A. YU., Puzakov S. V. Dinamika bokovo erozii na vognutykh beregah izluchin reki Oki v ee srednem techenii v XIX-XX vekah i na sovremennom etape // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta im. S. A. Esenina. 2020. T. 3. S. 27–46. DOI: 10.18384/2712-7621-2020-3-27-46.
5. Padalko YU. A., CHibilev A. A. Problemy razvitiya ruslovykh processov v bassejne r. Ural // Doklady akademii nauk. 2017. T. 475. № 6. S. 702–705. DOI: 10.7868/S0869565217240215.
6. Zubairov R. R., Ryzhkov I. B., Mustafin R. F., Rayanova A. R. Ustojchivost' landshaftnykh katen vodosbora rek // Prirodoobustrojstvo. 2018. T. 3. S. 73–80. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-3-73-80.
7. Mustafin R. F., Rahmatullin Z. Z., Rayanova A. R. Drevesno-kustarnikovaya rastitel'nost' pri ocenke ustojchivosti beregov rek // Prirodoobustrojstvo. 2016. T. 5. S. 108–114.
8. Ekologicheskie sistemy ostrovov Kujbyshevskogo vodohranilishcha. Kazanskij rajon peremennogo podpora / red. V.A. Bojko, B. R. Grigor'yan, D. V. Ivanov, V. G. Ivliev. Kazan': izd-vo «Fen», 2002. 360 s.
9. Atlas Respubliki Tatarstan / red. B.G. Petrov. Sankt-Peterburg: OAO «Ivan Fedorov», 2005. 216 s.
10. Ermolaev O. P., Igonin M. E., Bubnov A. YU., Pavlova S.V. Landshafty Respubliki Tatarstan: v 12 t. T. 2 / red. O.P. Ermolaev. Kazan': Slovo, 2007. 411 s.
11. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2014. Vol. II-4. P. 71–76. DOI: 10.5194/isprsannals-II-4-71-2014.
12. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models // IJGI. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 114. DOI: 10.3390/ijgi7030114.
13. Ul'danova R. A., Sabirov A. T. Produktivnost' dubovykh nasazhdenij pribrezhnykh territorij reki Volgi // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii. 2021. № 3(27). S. 11–22. DOI: 10.24852/2411-7374.2021.3.11.22
14. Kuznecov M. S., Glazunov G. P. Eroziya i ohrana pochv: Uchebnik. M.: Izd-vo MGU, 1996. 335 s.
15. Toptygin V. V. Organizaciya territorii pashni v usloviyah vodnoj erozii pochv. Metodicheskie ukazaniya. Krasnoyarsk: Krasnoyar. gos. agrar. un-t., 2018. 94 s.
16. Sentinel-2 User Handbook [Elektronnyj resurs]. 2015. Rezhim dostupa: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xls1t4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook. (data obrashcheniya 25.01.2022).
17. Kobayashi N., Tani H., Wang X., Sonobe R. Crop classification using spectral indices derived from Sentinel-2A imagery // Journal of Information and Telecommunication. 2020. Vol. 4. No. 1. P. 67-90. DOI: 10.1080/24751839.2019.1694765.
18. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
19. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning : Springer Texts in Statistics. New York, NY: Springer New York, 2013. 426 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7138-7. ISBN: 978-1-4614-7137-0.
20. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. // Geosci. Model Dev. 2015. Vol. 8. P. 1991-2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
21. R Core Team. A language and environment for statistical computing [Elektronnyj resurs]. 2020. URL: <https://www.R-project.org/>. (data obrashcheniya 25.01.2022).
22. QGIS Association. QGIS Geographic Information System [Elektronnyj resurs]. 2021. Rezhim dostupa: <http://www.qgis.org/>. (data obrashcheniya 25.01.2022).
23. Ben-David A. About the relationship between ROC curves and Cohen's kappa // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2008. Vol. 21. No. 6. P. 874-882. DOI: 10.1016/j.engappai.2007.09.009.

Поступила в редакцию 18.02.2022 г.