

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ  
И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.92:913.1:332.362

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИСТОРИИ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКОГО  
ОСВОЕНИЯ И ОЦЕНКА ТЕМПОВ ЭРОЗИИ ПОЧВ  
В БАССЕЙНЕ р. ЛОКНА, ТУЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ

© 2023 г. Н. Н. Иванова<sup>а</sup> (ORCID: 0000-0002-9190-4392), Д. В. Фомичева<sup>б</sup>,  
Д. И. Рухович<sup>б</sup>, Е. Н. Шамшурина<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: shamshyr@mail.ru

Поступила в редакцию 21.11.2022 г.

После доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 22.02.2023 г.

По литературным и архивным данным прослежена динамика распаханности Тульской области/губернии в целом и отдельных ее уездов. Установлено, что массовое земледельческое освоение южной части современной Тульской области началось не ранее середины XVII в. По картам разных лет создания определены изменения площади пашни в бассейне р. Локны (Плавский район Тульской области) с конца XVIII в. до настоящего времени. Достоверность полученных величин распаханности территории подтверждена литературными данными. Реконструирован состав полевых культур и изменения систем земледелия в течение рассматриваемого периода, выявлена значительная консервативность этих показателей: паровое трехполье господствовало на протяжении XIX в. и первой половины XX в., преобладание ржи в озимых посевах и овса в яровых сохранялось до 1970-х гг. По WaTEM/SEDEM с использованием в качестве входных параметров основных факторов эрозии, реконструированных на основе исторических данных, рассчитаны интенсивность и объемы ливневого смыва для выделенных этапов освоения бассейна р. Локна. С целью сравнения результатов с литературными данными для периода 1980–1993 гг. рассчитаны темпы и объемы талого смыва. Проведена оценка достоверности реконструированных параметров модели для отдаленных исторических эпох. Проведен анализ исторических изменений факторов и темпов эрозии. Установлено, что максимум распаханности и интенсивности проявления эрозионных процессов в бассейне р. Локны наблюдался в последней четверти XIX–начале XX вв. Выявлено влияние расположения пахотных угодий относительно элементов рельефа на величины темпов и объемов смыва.

**Ключевые слова:** площадь пашни, состав севооборотов, ретроспективное моделирование ливневой эрозии, WaTEM/SEDEM, Luvic Chernic Phaeozems, Luvic Greyzemic Chernic Phaeozems

**DOI:** 10.31857/S0032180X22601475, **EDN:** VONWQZ

## ВВЕДЕНИЕ

Обрабатываемые угодья (территории, где не менее 30% ландшафта – это пахотные земли) в настоящее время покрывают почти четверть сухопутной поверхности Земли. За 30 лет после 1950 г. было распаханно больше земель, чем за 150 лет в период между 1700 и 1850 гг. [46]. Развитие эрозионных процессов на сельскохозяйственных землях, помимо снижения плодородия и ухудшения физических характеристик почв в результате рекультивации верхних горизонтов, приводит к активизации выноса почвенно-грунтового материала за пределы пашни. Поступление насыщенных удобрений, пестицидами и другими загрязняющими веществами продуктов смыва способствует

деградации луговых угодий, заилению и эвтрофикации поверхностных водотоков и водоемов, ухудшению качества воды. Это становится серьезной экологической и экономической проблемой, поскольку ущерб от деградации окружающей среды может в разы превышать потери от снижения плодородия почв [17]. Динамика темпов эрозионно-аккумулятивных процессов на склоновых распаханых водосборах во многом определяется изменениями площади пашни и положения границ полей относительно элементов рельефа, а также изменениями почвозащитной способности высеваемых культур в течение всего периода земледельческого освоения территории. Инструментом, позволяющим выявить тренды антропогенной нагрузки на агроландшафты про-

шлого, может служить количественная оценка интенсивности смыва при помощи математического моделирования с использованием исторических данных об изменениях основных факторов эрозии. Реконструкция темпов эрозионно-аккумулятивных процессов при различных сценариях землепользования дает возможность понять и объяснить современное пространственное положение ареалов смыва и аккумуляции, что невозможно сделать, если учитывать только современную структуру агроландшафта. Выявленные тренды преобразования структуры почвенного покрова в долгосрочной перспективе могут служить основой для создания экологически безопасных сценариев сельскохозяйственного производства и повышения качества предоставляемых экосистемных услуг [49].

Основным лимитирующим фактором в ретроспективных исследованиях динамики землепользования является требование к наличию картографических материалов нужной детальности для возможно большего количества временных срезов. Вероятно, поэтому основная масса работ по реконструкции темпов смыва охватывает период с 50-х гг. прошлого века, для которого доступны аэрофотоснимки, космоснимки и картографические материалы надлежащего качества [24, 48, 54, 57, 61]. Возможность изучения длительной истории землепользования существует, например, для стран, входивших в состав Австро-Венгерской империи, где первые кадастровые карты для всей территории были созданы в период с 1826 по 1843 гг. [51, 53, 56]. В нашей стране точкой отсчета для любых исследований, связанных с динамикой границ сельхозугодий, являются Атласы и планы Генерального межевания (ГМ), проводившегося в разных губерниях преимущественно Европейской территории России в период с конца XVIII в. по первую четверть XIX в., поскольку это первые картографические источники, отображающие расположение пахотных массивов. Отечественные работы по ретроспективной количественной оценке интенсивности эрозии за длительный период весьма немногочисленны. Это реконструкция изменений границ сельхозугодий и темпов и объемов смыва за 250-летний период для участка на юге лесной зоны [63], моделирование эрозии за всю историю земледельческого использования для малого водосбора в Курской области [10], оценка изменений объемов смыва, вызванных смещением границ пашни на малом водосборе в Тульской области [64].

Результаты моделирования эрозионных процессов в большой степени определяются надежностью определения входных параметров: морфологии рельефа, эрозионного потенциала осадков, эродированности почв и почвозащитных свойств агроценозов. А в случае ретроспективной оценки

темпов смыва за длительный период это обстоятельство приобретает решающее значение.

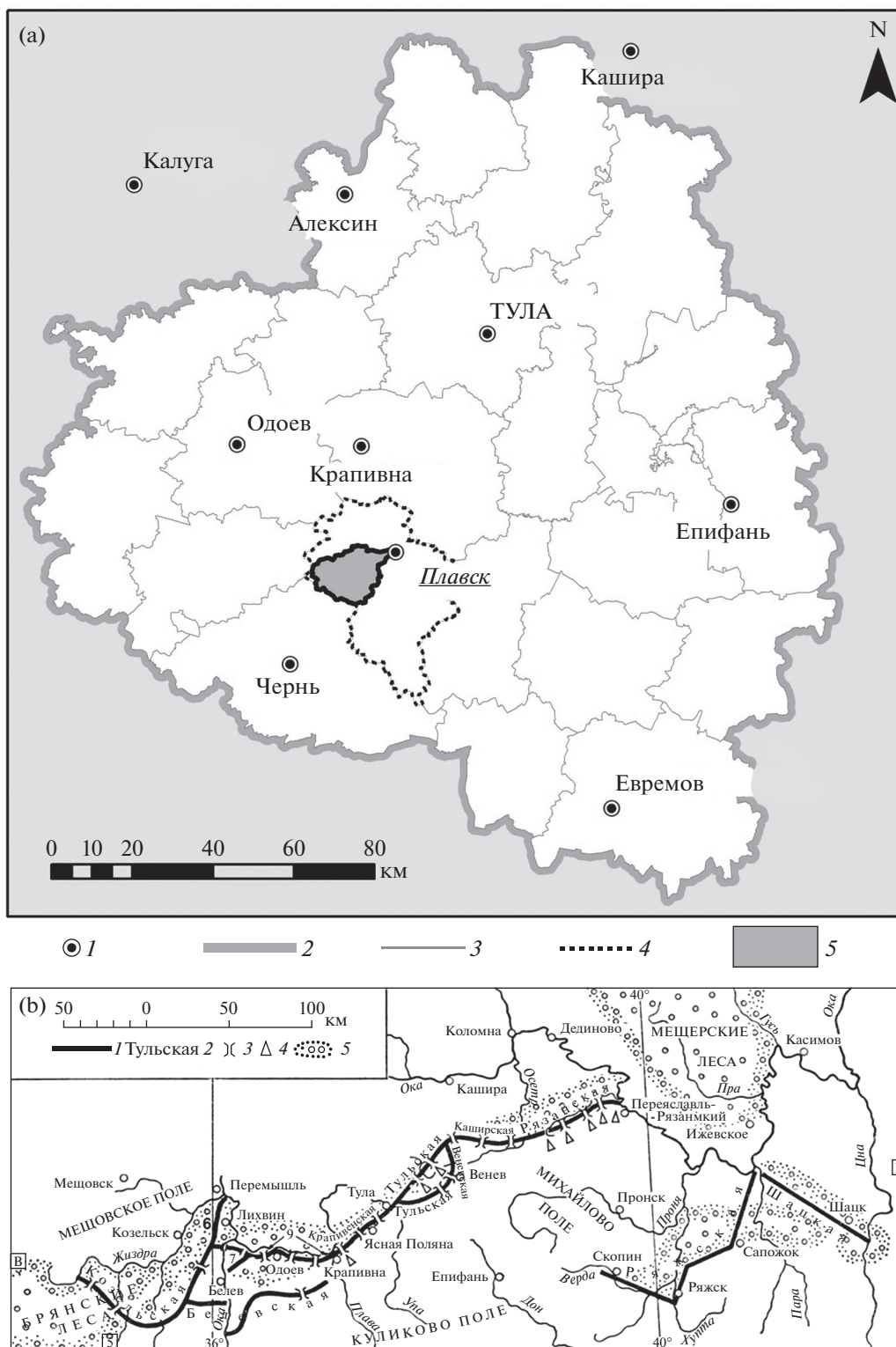
Цель работы – реконструкция исторических изменений основных факторов эрозии в бассейне малой реки лесостепной зоны Европейской территории России с определением степени достоверности и ретроспективная оценка интенсивности смыва почвы при выпадении ливневых дождей путем математического моделирования с использованием реконструированных входных параметров за период с конца XVIII в. до наших дней.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Реконструкцию пространственного положения границ угодий, изменений состава полевых культур и расчеты темпов смыва проводили для бассейна малой р. Локны, левого притока р. Плева (площадь водосбора 174.8 км<sup>2</sup>, длина 21 км), расположенного в Плавском районе Тульской области (рис. 1а).

**Природные условия.** Бассейн р. Локна характеризуется типичным для наиболее возвышенной северо-западной части Среднерусской возвышенности холмисто-увалистым эрозионным рельефом с расчлененными ложбинами и потяжинами выпуклыми склонами и густой сетью глубоко врезанных балок и речных долин. Средняя глубина вертикального расчленения составляет 60–70 м. С точки зрения физико-географического районирования это Соснинско-Упинский известняковый возвышенный долинно-балочный вторично степной район типичной лесостепи с преобладанием плакорных склоновых типов местностей [44]. Климат района умеренно континентальный, средняя температура января –10°C, июля +19°C. Среднегодовое количество осадков составляет 525–630 мм. Согласно почвенно-географическому районированию, территория относится к Среднерусской лесостепной провинции, Новомосковско-Плавскому почвенному району оподзоленных и выщелоченных черноземов. В почвенном покрове бассейна доминируют черноземы выщелоченные (Luvic Chernic Phaeozems) и оподзоленные (Luvic Greyzemic Chernic Phaeozems). Почвообразующей породой являются карбонатные лёссовидные суглинки [35].

В настоящее время склоны междуречий полностью распаханы, пашня практически повсеместно доходит до бровок долинно-балочной сети. Естественная травянистая растительность сохранилась местами на бортах долин, где не производится выпас скота. Леса встречаются на бортах эрозионных форм и в виде редких небольших массивов на возвышенных участках водораздельных пространств. Характерной чертой агрогенного микрорельефа являются напаша – линейные



**Рис. 1.** Местоположение района исследований (а): 1 – населенные пункты, 2 – граница Тульской области, 3 – границы районов, 4 – граница Плавского района, 5 – бассейн р. Локна. Расположение участков засечной черты в XVII в. (б): 1 – Большая засечная черта, 2 – названия засек, 3 – ворота в засеках, 4 – крепостцы, 5 – леса (по [47]).

формы в виде валов высотой до 1.5 м вдоль нижней границы пашни. Помимо современных напашей, на склонах малых долин в бассейне р. Локны, как и в Тульской области в целом, часто встречаются старые формы, маркирующие положение нижней границы полей в предыдущие периоды освоения [19].

**История освоения.** Южная часть Тульской области, где расположен бассейн р. Локны, относится к зоне первоначальной колонизации, заселенной в XVI–XVIII вв. [11]. Освоение заокских земель к югу от Москвы сдерживалось угрозой крымско-ногайских набегов, которые начались после обособления Крымского ханства в конце XV в. и продолжались на протяжении почти двух столетий. Постоянная опасность заставила создать сложную систему защиты и управления южнорусским пограничьем – польской Украиной [47], включавшую строительство и укрепление засечных черт. Большая Засечная черта в рассматриваемом регионе проходила в окрестностях Белева, Одоева, Крапивны и прикрывала Тулу (рис. 1б).

Земледельческое освоение земель, лежащих к югу от засечной черты, было существенно ограничено. Так, в переписи селений, расположенных в 20-верстной полосе вдоль одного из участков засек, с русской стороны насчитано 67 сел, 139 деревень, 5 починков, 99 пустошей, 22 погоста, пашни 36308 четей, а с полевой стороны – “оброчных земель две пустоши, 25 полянок да луги Мошинские” [47, с. 44].

Только к середине XVII в. южный фронтир окончательно перемещается к Белгородской укрепленной линии, оставляя в тылу районы Тульских и Крапивенских засек, в том числе бассейны рек Плавы и Локны. Отставание в степени освоения сохранялось длительное время. Определенная по итогам писцовых книг во второй четверти XVII в. распаханность земель в уездах Тульской губернии показывает тесную связь с их географическим положением. Если в северных Алексинском и Каширском уездах пашня занимала 40–50% территории, то в плодородных черноземных Крапивенском, Чернском, Епифанском, Ефремовском – от 3 до 24% [6]. Показательно, что и с. Сергиевское, расположенное у слияния рек Локны и Плавы (ныне г. Плавск) основано в 1671 г.

С конца XVII в. земледельческое освоение района исследований стало массовым и шло высокими темпами. К моменту Генерального межевания Тульского наместничества (1778–1780 гг.) бассейн р. Локны располагался в пределах двух уездов: Крапивенского и Чернского. В Крапивенском уезде пашня занимала 78% территории [1], в Чернском – 78.6% [18]. В течение первой половины XIX в. прирост пахотных угодий практически не происходил, в 1852 г. распаханность земель

Крапивенского уезда оставалась на уровне 78% [7]. После реформы 1861 г. земельные участки крестьянам часто отводили на неудобьях. По данным Экспедиции по исследованию источников главнейших рек Европейской России в бассейне верхнего течения р. Оки и на водосборах притоков верхнего Дона в пореформенное время крестьянские наделы нарезались на бортах малых долин [3]. Статистические данные по Тульской губернии в целом показывают, что площадь неудобий сократилась с 9% в 1850-х гг. [7] до 2.9% в конце 1880-х гг. [9]. Эта информация дает основания предполагать, что сохранившиеся до настоящего времени старые напашы на бортах долинной сети в бассейне р. Локны маркируют нижние границы наделов, распашка которых произошла в 1860–1870 гг.

По результатам поземельной переписи 1887 г. [9] в Крапивенском уезде в 1881 г. было распаханно 78.4% земель, а в 1887 г. – 79.8%, в Чернском уезде – 79.8 и 80.5% соответственно. Таким образом, за 200 лет с конца XVII в. по конец XIX в. в исследуемом регионе в земледельческий оборот было введено от 56 до 64% территории, и степень распаханности приблизилась к предельной.

Статистические данные о распаханности территории в первой четверти XX в. отрывочны и неоднозначны. В 1900–1902 гг. в Чернском уезде распахивалось 85% надельной крестьянской земли, в Крапивенском уезде – 80.1% [16]. Эти данные по крестьянским наделам можно отнести к распаханности земель в уездах в целом, поскольку в Центральной черноземной области разница в распределении угодий на крестьянских и владельческих землях, вследствие громадного преобладания пашни (от 2/3 до 3/4 всей земли вообще), была весьма незначительной [36]. По данным Всероссийской сельскохозяйственной и Поземельной переписи 1917 г. [34], в Чернском уезде по всем категориям хозяйств распахивалось 79.8% земель, в том числе в крестьянских хозяйствах 81.4%. В начале 1920-х гг. из-за продразверстки тульские крестьяне резко сократили площади посевов. Если в 1910–1912 гг. в губернии засеивали 1 млн 254 тыс. десятин земли, то в 1920 только 63% от этой величины, а в 1921 – 48% от уровня 1910-х гг. [31]. Однако введение НЭПа и отмена продналога привели к быстрому восстановлению площади пашни.

Великая Отечественная война нанесла значительный ущерб сельскому хозяйству области. Район исследований был оккупирован, на его территории велись боевые действия. Посевные площади Плавского, Чернского и Крапивенского районов достигли довоенного уровня только к середине 1950-х гг. [28]. В 1956 г. в Тульской области распахивалось 67.8% земель [27]. До 90-х гг. XX в. распаханность колебалась в диапазоне 60–68%.

**Таблица 1.** Использованные картографические материалы

Название	Масштаб	Годы создания	Точность отображения контуров эрозионной сети, м
План Генерального межевания Чернского уезда	1 : 42000	1776–1780	200
Военно-топографическая карта (карта Шуберта)	1 : 126000	1880-е	150
Топографическая военная карта Рабоче-крестьянской Красной Армии	1 : 100000	1939–1941	80
Топографическая карта	1 : 25000	1960	30

Значительные изменения в сельском хозяйстве произошли в 1990-е годы. В результате экономического и политического кризиса началось сокращение площади реально обрабатываемых земель. В Докладе о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения в Российской Федерации в 2014 г. [12] приводится площадь неиспользуемой пашни в Тульской области в 521.1 тыс. га, что составляет 20.3% от всего земельного фонда. На основании этих данных можно рассчитать, что в 2014 г. в Тульской области распаивалось около 40% земель. Анализ динамики посевных площадей за период 2000–2018 гг. показывает, что это была минимальная величина распаиваемости [43], в последующие годы шел процесс введения в сельскохозяйственный оборот ранее заброшенных земель. По данным Управления Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Тульской области [13] в настоящее время пашня занимает 60.6%, залежи – 0.3%.

**Анализ изменений состава полевых культур и систем земледелия.** Анализ литературных и архивных источников показал, что набор высеваемых растений и практикуемые системы земледелия в исследуемом регионе оказались величинами консервативными. В течение всего XIX в. и первой четверти XX-го столетия преобладающей системой было классическое паровое трехполье. Среди озимых культур почти 200 лет (с конца XVIII в. и вплоть до 70-х гг. XX в.) господствовала озимая рожь, которая в XVIII и XIX вв. была основной продовольственной культурой крестьянского населения. Только в последней четверти XX в. пшеница стала преобладающей озимой культурой. Среди яровых в конце XVIII и первой половине XIX в. главной культурой был овес, далее с большим отставанием в зависимости от местности высевались гречиха или просо, а также в незначительных количествах ячмень, лен, горох [4, 42]. Только к середине XIX в. стали появляться первые посевы пропашных культур – картофеля и сахарной свеклы [7]. Площади под ними были очень незначительны, свекловица для переработки в сахарный песок разводилась только в трех

уездах губернии, в том числе в Чернском, небольшие поля располагались вблизи сахароваренных заводов [30].

Вплоть до середины 1930-х гг. в исследуемом регионе в основном продолжало преобладать трехполье. Главной культурой оставалась озимая рожь, немного увеличилась доля озимой пшеницы, несколько сократились посевы овса и увеличилась доля гречихи и кормовых культур [32].

К середине 1950-х гг. в посевах почти четверть площадей занимала озимая рожь, 19% было под овсом. Увеличилась доля пропашных культур, в основном картофеля и кукурузы на зерно [28].

В конце 1970-х гг. за счет исчезновения паров увеличились посевы зерновых культур и картофеля, началось промышленное выращивание овощных культур. К 1980-м годам посадки овощей занимали более трети посевных площадей [29]. К началу 1990-х гг. происходило дальнейшее расширение площадей под пропашными культурами. Кукуруза, картофель и сахарная свекла составляли почти половину посевов. До 10% площади было под многолетними травами [21].

В начале XXI в. сохранились практически неизменными площади под зерновыми, значительно уменьшилась доля пропашных и овощей, ошутимо увеличились посевы многолетних трав. С 2005 г. до настоящего времени идет увеличение площадей под озимой пшеницей с одновременным уменьшением их под озимой рожью. Резко уменьшаются посевы многолетних трав, к 2018 г. отмечается практически двукратное сокращение площади чистых паров.

**Реконструкция границ пашни.** Определение расположения и площади пахотных угодий для разных временных отрезков исследуемого периода проводили по старинным и современным картам, а также космоснимкам. Основным требованием для картографического источника, используемым для исторической реконструкции, является характер отображения на них границ угодий, позволяющий произвести адекватную привязку к цифровой модели рельефа (табл. 1). Желательно,

чтобы карты максимально равномерно освещали выбранный исторический интервал.

Границы пашни по старинным, современным картам и космоснимкам оцифровывали вручную. Схемы землепользования на периоды с 1780 по 1941 гг. создавали по историческим картам, подобраным на электронном ресурсе в сети Internet: <http://www.etomesto.ru/>.

Привязка старинных карт процесс непростой. Неточности привязки определяются как изменением границ объектов за счет искажения бумажного листа карты при сканировании, так и ошибками в прорисовке географической обстановки на подлинниках. Особенно это справедливо для таких картографических источников, как планы ГМ, которые по способу создания являются не инструментальными. В XVIII в. практики съемок с непосредственным вычерчиванием ситуации в поле на “геометрическом столике” (мензуле) еще не было. Карты ГМ были графическим изложением съемочных журналов-описаний. Сохранялся и даже узаконивался разрыв во времени между съемкой и составлением планов и межевых книг [33]. Отрисовка эрозионной сети на планах ГМ зачастую отличается существенными неточностями, как в отношении плановых очертаний, так и наличия некоторых ее элементов.

На плане ГМ Чернского уезда [8] отдельными знаками обозначены селитебные территории, дороги, луга, леса и пашни. Смещение тальвегов эрозионной сети относительно их реальных очертаний в среднем составляет 200 м. Положение оцифрованных границ пашни было скорректировано относительно контуров существующей эрозионной сети на современных космических снимках высокого разрешения (дистанционное зондирование Земли с сайта Yandex с пространственным разрешением 0.8–6 м и с сайта Google с пространственным разрешением 0.8–1.2 м).

На Военно-топографической карте Российской империи (составитель – Ф.Ф. Шуберт, масштаб 3 версты в дюйме, что эквивалентно М 1 : 126000) отдельными знаками обозначены населенные пункты с прилежащими угодьям (огородами, садами, хмелевыми плантациями и т.д.), луга, курстарники, леса, болота, дороги. Для листа 15–15, куда попадает большая часть бассейна р. Локны, указаны годы создания 1874–1901, однако непосредственные съемочные работы проводили в 1880-х гг. На карте нет специальных обозначений для пашни, но детальность отображения других угодий (лесов, болот и лугов) и селитебных территорий позволяет допустить, что все оставшиеся свободные площади были под пашней. Эрозионная сеть имеет более приближенные к реальности очертания, на карте показаны все существующие балочные формы и их отвершки, однако смещение относительно ее истинного положения в

среднем составляет 150 м. Отсутствие специального обозначения для пахотных угодий (т.е. отсутствие линейных границ) несколько снижает точность оцифровки.

На карте Рабоче-крестьянской Красной Армии 1939–1941 гг. отдельными знаками обозначены селитебные территории, дороги, луга, леса и пашни. Изображение эрозионной сети отличается большей точностью, в среднем смещение составляет 80 м.

Для определения границ пашни в 1960 г. использовали отсканированные листы топографической карты масштаба 1 : 25000. Они привязывались вручную по опорным точкам, таким как церкви в крупных селах, изгибы реки, повороты крупных дорог. Точность привязки составила 20 м. На карте отдельными знаками обозначены селитебные территории, дороги, луга, леса и пашни. Смещение изображения эрозионной сети относительно реальных ее очертаний не превышало 60 м в редких случаях при плохой сохранности листа карты.

Для реконструкции структуры землепользования после 1969 г. были использованы подробные схемы границ пашни (М 1 : 10000), созданные на основе тематического дешифрирования космических снимков, полученных разными спутниками с 1969 по 2020 гг. с пространственным разрешением от 0.8 до 30 м (Landsat 8 разрешением 15 м, ДДЗ с сайта Yandex с пространственным разрешением 0.8–6 м и с сайта Google с пространственным разрешением 0.8–1.2 м, а также панхроматическая съемка, спутник КН-9 (1975 г.) и КН-4В (1968 г.) Corona США с пространственным разрешением 1.8 и 6 м), топографических и кадастровых карт различного масштаба (от 1 : 25000 до 1 : 200000), по методике ретроспективного мониторинга почвенно-земельного покрова, изложенной в работах [5, 37–40].

**Анализ динамики почвозащитной способности агроценозов и выделение этапов освоения.** Реконструкция темпов смыва с пашни за весь период сельскохозяйственного использования территории требует оценки изменений почвозащитной способности агроценозов. Как показано выше, количественные данные о площадях под разными культурами появились только в 80-х годах XIX в. Для почти столетнего периода после проведения ГМ были найдены только сведения о составе посевов за отдельные годы. Поэтому реконструкция приблизительной структуры севооборотов проводилась следующим образом. Был составлен перечень полевых культур, когда-либо высевавшихся в течение этого периода, которые были объединены в группы по степени их почвозащитной способности: озимые, яровые густопокровные, пропашные, многолетние травы. Оценить долю площади, занимаемой каждой из групп, помогает знание о

практиковавшейся системе земледелия. Классическое паровое трехполье предполагает деление пахотных земель на озимый, яровой и паровой клин, примерно равные по площади. Основной озимой культурой была рожь, следовательно, она занимала около 30% пашни. Примерное соотношение групп культур в яровом поле определялось путем экспертной оценки. Таким образом были получены соотношения доли озимых, яровых, пропашных культур, пара и многолетних трав в процентах от общей площади пашни по годам, для которых были найдены данные. Далее был проведен анализ изменений в структуре посевов, значимых для их противоэрозионной роли, таких, как исчезновение паров, появление пропашных культур и многолетних трав и др. Весь изучаемый период был разделен на временные отрезки, в течение которых соотношение групп культур с различной почвозащитной способностью оставалось относительно постоянным, также принималось во внимание время создания использованных для реконструкции площадей пашни картографических материалов. Было сделано допущение, что положение и площадь пашни не изменялись на протяжении каждого выделенного этапа. В качестве соотношения площадей, занятых группами культур, принимали средние значения для всех имеющихся годовых данных каждого временного отрезка.

### Моделирование эрозии

**Характеристики использованной модели.** Для расчета ливневого смыва использовали WaTEM/SEDEM (Water and Tillage Erosion Model and Sediment Delivery Model) — модель эрозии почвы, работающую на основе растровой ГИС, разработанную в Католическом университете Левен, Бельгия [59, 60]. Порядок расчетов и входные параметры основаны на алгоритме RUSLE. Разработчики модели позиционируют ее как пространственно-распределенную, в ней имеется блок, позволяющий рассчитывать переотложение наносов. Модель широко используется в последние годы [55, 61], в том числе для ретроспективных оценок темпов эрозионно-аккумулятивных процессов [51, 58, 63, 64].

Расчет потерь почвы от смыва в период весеннего снеготаяния традиционно проводится на основе модели Государственного гидрологического института (ГГИ), переработанной Г.А. Ларионовым [22]. Одним из входных параметров является слой поверхностного весеннего склонового стока. Его формирование — это чрезвычайно многофакторный, трудно прогнозируемый процесс. Не существует однозначной зависимости между предвесенними запасами воды в снеге и количеством твердых осадков [24]. В последние десятилетия весенний сток наблюдается только в отдель-

ные годы, что связывают с общим изменением климата. По данным наблюдений на Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции, располагающейся в 80 км к югу от участка исследования, с середины 1990-х гг. началось значительное сокращение величины поверхностного стока при снеготаянии, а в последние 20 лет коэффициент стока равен 0 [2]. Восстановить динамику слоя поверхностного стока за 250 лет практически не представляется возможным. Экстраполяция на весь агрикультурный период значений талого стока для годов разработки модели ГГИ (1970-е), когда зимой наблюдались устойчивые отрицательные температуры и постоянный снежный покров, является значительным допущением в связи с отсутствием данных о погодных условиях, характерных для XVIII и XIX вв. Например, в 1925 г. метеостанция одного из Тульских оружейных заводов зафиксировала сход снега в январе, в феврале слой снега составил 1 см, а к 20 марта снежный покров полностью исчез [20]. Поэтому в представленной работе рассчитывали смыв почвы от стока ливневых вод, а расчет суммарного смыва проводили только для обеспеченного данными периода 1980—1993 гг. для возможности сравнения расчетных значений с литературными оценками.

**Определение входных параметров модели.** В WaTEM/SEDEM используются входные параметры, характеризующие морфологию рельефа, эрозионную способность осадков, эродруемость почв и почвозащитные свойства севооборотов. Эрозионный потенциал рельефа (*LS*-фактор) определялся на основе цифровой модели рельефа из открытого источника (SRTM) с размером ячеек 30 × 30 м. Эрозионный потенциал ливневых осадков (*R*-фактор) рассчитывали на основании среднесуточных измерений суммы осадков [52] метеостанции в г. Павлец в 130 км от бассейна р. Локна. Здесь имеется наиболее полный ряд данных, начиная с 1936 г., позволяющий проследить динамику выпадения осадков. Изменения *R*-фактора на протяжении инструментального периода наблюдений имеют волнообразный характер. Так, его значения для периода 1941—1965 гг. равны среднему за все годы (262 МДж мм/(га ч год)). Максимальные значения *R*-фактора отмечены для периода 1965—1980 гг. Далее прослеживается тенденция к снижению значений до минимальных в 1993—2010 гг. С 2010 по 2019 гг. наблюдается увеличение значений эрозионного потенциала осадков.

Коэффициент эродруемости почвенного покрова (*K*-фактор) рассчитывали на основе натуральных определений содержания  $S_{opt}$  и гранулометрического состава в 28 точках опробования пахотного горизонта (0—25 см) одного из ранее исследованных авторами малых водосборов с типичным для бассейна р. Локны рельефом и структурой поч-

венного покрова [64]. Образцы отбирали по катенам на склонах разной экспозиции, в выборку вошли черноземы выщелоченные и оподзоленные разной степени эродированности. В зависимости от степени редукции почвенного профиля содержание органического углерода изменяется от 1.8 до 4.4% (среднее значение для водосбора 3.4%, коэффициент вариации 15%). Среднее содержание илистой фракции в пахотном горизонте почв разной степени смытости составляет 53.3% (коэффициент вариации 3%). В итоге коэффициент вариации  $K$ -фактора не превышает 6%. Черноземы выщелоченные и оподзоленные в бассейне р. Локна отличаются тяжелым гранулометрическим составом, различия в содержании фракции ила в пахотном горизонте почв разной степени смытости невелики [45], что подтверждается и нашими расчетами. На исследованном водосборе представлены практически все варианты агрогенной трансформации почвенного профиля, встречающиеся в бассейне р. Локна – от несмытых почв, где пахотный горизонт формируется из материала горизонта А, до сильносмытых. Можно предположить, что варьирование значений  $K$ -фактора для всего исследуемого периода с последовательным появлением ареалов все более и более смытых почв также будет незначительным. В этой связи надо отметить, что глубина вспашки не была постоянной – до 1910-х гг. при обработке без оборота пласта она не превышала 10–12 см [36], т.е. мощность  $A_{\text{пах}}$  была вдвое меньше современной. Таким образом, при средней глубине подошвы горизонта А 50–55 см даже на сильносмытых почвах пахотный горизонт формировался в предшествующие эпохи из материала горизонта А, без подпахивания нижележащих более бедных гумусом слоев.

Для определения почвозащитной способности агроценозов ( $C$ -фактор) для выделенных групп культур были приняты агроэрозионные индексы, рассчитанные Ларионовым [22] в рамках адаптации базы данных универсального уравнения эрозии (USLE) для условий России.

Степень точности реконструкции входных параметров модели различна. Наиболее достоверной является оценка рельефа пашни. Знание пространственного положения границ распаханых участков на разных этапах освоения позволяет проводить расчет фактора  $LS$ . Реконструируя динамику почвозащитной способности агроценозов, надо иметь в виду, что прямая экстраполяция современных агроэрозионных индексов на исторический период в несколько веков невозможна без определенных допущений. Агроэрозионные индексы были разработаны в 70–80-х годах XX в. на основании полевых опытов. За 200 лет до этого культивировались сорта с другой биомассой, сроками наступления фенофаз и выхода на пороговые значения проективного покрытия. Менялись

сроки и технологии сева – строчный посев стал практиковаться в исследуемом регионе только на рубеже XIX и XX вв. с появлением механических сеялок [36], до этого сеяли вручную вразброс. Коэффициент эродированности почв в расчетах принимали неизменным. При использовании WaTEM/SEDEM в пределах территорий, где в отличие от бассейна р. Локна распространены почвы, профиль которых характеризуется значительной неоднородностью гранулометрического состава, вероятно, необходимо учитывать изменения коэффициента эродированности  $K$  в течение периода землепользования, вследствие увеличения со временем степени смытости почв.

Наибольшая неопределенность имеет место при реконструкции эрозионного потенциала осадков. Инструментальные измерения суточного слоя осадков производятся с конца XIX в. Оценка динамики эродирующей способности дождей для отдаленных по времени эпох возможна только качественно на основе косвенных данных, например, повторяемости влажных и сухих лет [50] или по колебаниям урожайности сельскохозяйственных культур и их возможной связи с агрометеорологическими факторами [14, 15]. В Атласе засухи европейской части России за 1400–2016 гг. на основании сети из 697 годовых хронологий годовых колец деревьев был рассчитан средний самокалибрующий индекс интенсивности засухи Палмера ( $PDS$ ) за июнь–июль–август [50]. Установлено, что на Европейской территории России частота влажных лет с  $PDS$  выше одного стандартного отклонения за 1795–2015 гг. является относительно стабильной характеристикой. При исследовании урожайности яровой пшеницы в Европейской территории России выявлена 28-летняя цикличность и сделано предположение о связи этого показателя с 30-летним периодом колебания осадков. Установлено, что отличия средних значений фактической урожайности по выделенным периодам варьируют в пределах 10% от общего среднего для временного отрезка 1800–1965 гг. [14, 15]. Таким образом, прослеживается невысокая вариабельность показателей повторяемости влажных лет и урожайности зерновых, что позволяет сделать предположение об относительной стабильности метеорологических условий. В настоящей работе по аналогии с другими работами по ретроспективной оценке темпов эрозии почв [51, 63] для четырех расчетных периодов, начиная с конца XVIII в., была принята одинаковая средняя величина  $R$ -фактора.

Таким образом, чем дальше по временной шкале отстоит от сегодняшнего дня каждый расчетный период, тем более увеличивается неопределенность реконструированных величин входных параметров модели. Это необходимо учитывать при оценке области ее применения.



**Таблица 2.** Изменения основных факторов эрозии, темпов и объемов ливневого смыва и площадей пашни в бассейне р. Локна на разных этапах освоения

Период, годы	Доля пашни, % от площади бассейна	Входные параметры модели (факторы)			Темпы смыва, т/га в год	Объем смыва, тыс. т в год
		<i>R</i>	<i>C</i>	<i>K</i>		
1797–1861	79	262	0.45	51	10.5	147
1861–1913	81	262	0.45	51	11.3	163
1913–1941	71	262	0.42	51	9.6	121
1941–1965	72	262	0.32	51	7.0	90
1965–1980	72	312	0.32	51	8.2	105
1980–1993	64	280	0.38	51	8.5	96
1993–2010	51	227	0.29	51	5.4	49
2010–2019	58	268	0.30	51	6.7	69

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Оценка достоверности определения площади пахотных угодий.** Проведено сравнение площадей пашни, полученных путем оцифровки границ угодий на старинных картах, с литературными данными об изменениях распаханности в Крапивенском и Чернском уездах и Тульской губернии/области в целом.

Сравнение данных показывает, что площади пашни исследованного участка, рассчитанные по картам XVIII и XIX вв., точность которых вызывает наибольшие сомнения (планы ГМ и Военно-топографическая), хорошо совпадают с литературными данными по Крапивенскому и Чернскому уездам (расхождения составляют не более 2%) (табл. S1). Для последующих эпох сравнение может проводиться только с данными о распаханности Тульской губернии/области в целом. Вследствие значительной внутренней неоднородности природных условий по причине переходного положения территории между лесной и лесостепной зонами, сопоставлять можно не величины распаханности, а только тренды их изменений. Полученный тренд для бассейна р. Локны на конец XX и начало XXI вв. близок к динамике пашни Тульской области в целом. Надо отметить, что показатели официальной статистики часто не отражают реального положения вещей. Сравнительный анализ данных сельскохозяйственных переписей за 2006 и 2016 гг. и Росреестра за 2002 и 2016 гг. по Тульской области [41] показал, что сведения о площадях пашни Росреестр завышает на 3–10%, а по залежам занижает на порядок. По мнению Люри с соавт. [26], Тульская область представляет собой пример региона с медленным сокращением сельскохозяйственных земель в XX в. и ускоренным – на рубеже XX и XXI вв. Их пло-

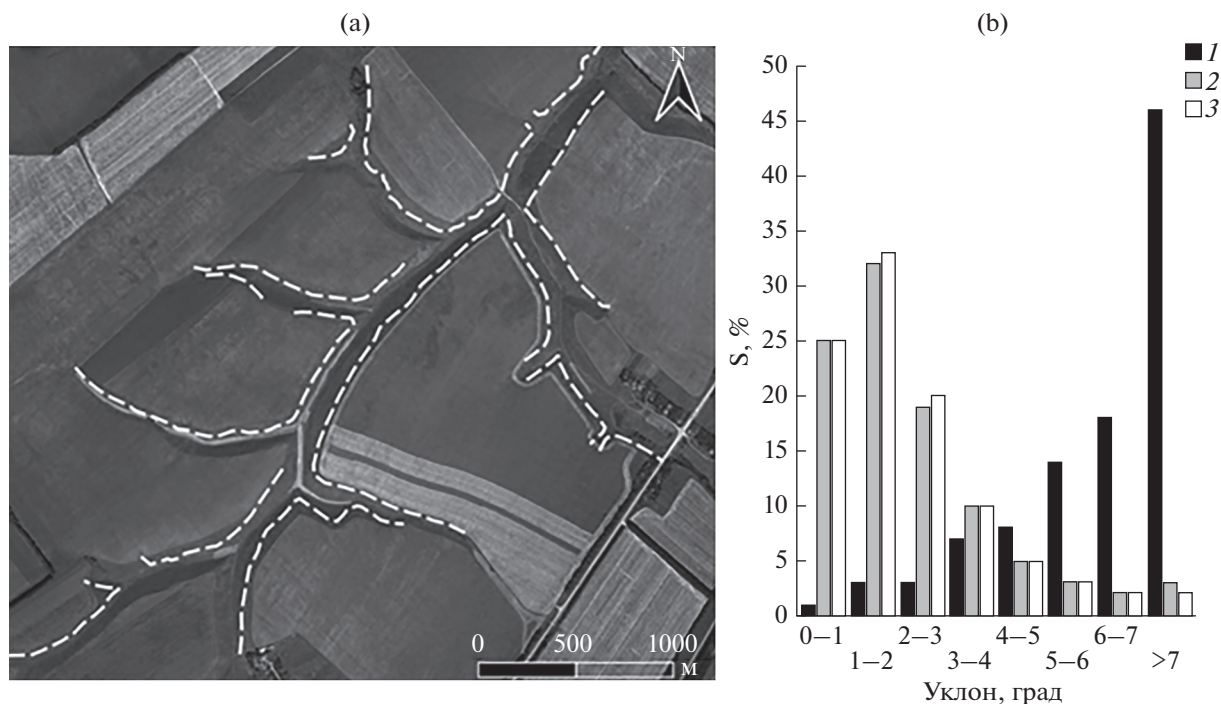
щадь с 1897 по 1990 гг. уменьшилась в среднем на 7.3%, а с 1990 по 2007 г. – на 38%.

**Анализ динамики почвозащитной способности посевов в течение исследуемого периода.** Для полученных соотношений групп культур с различной почвозащитной способностью для каждого выделенного периода освоения бассейна была рассчитана средняя почвозащитная способность агроценозов (*C*-фактор). Результаты представлены в виде диаграммы (рис. S1).

Почвозащитная способность агроценозов в течение исследуемого периода изменялась от 0.29 до 0.45 (табл. 2). Низкая противоэрозионная стойкость севооборотов в период господства парового трехполья объясняется высокой долей черного пара. В дальнейшем внутри выделенных периодов наблюдались разнонаправленные тенденции. Так, в середине XX в. почти полное исчезновение паров и появление посевов многолетних трав происходило с одновременным увеличением доли пропашных. Однако, несмотря на низкую почвозащитную способность пропашных культур, наиболее сильное влияние на средние значения *C*-фактора для каждого периода оказывает количество паровых земель.

**Изменения темпов и объемов ливневого смыва.** В результате моделирования была получена серия карт с пространственным положением зон с разными темпами смыва в бассейне р. Локны для каждого периода освоения (рис. S2). Диапазон изменений полученных значений темпов ливневого смыва за весь изученный период составил от 5.4 до 11.3 т/га в год (табл. 2).

Согласно нашим расчетам, максимальные темпы и объемы смыва получены для периода 1861–1913 гг. при том, что эрозионный потенциал осадков, почвозащитная способность агроценозов и эродлируемость почв были неизменными по



**Рис. 2.** Положение старых границ пашни (пунктиром) на бортах балки Часовенков верх, фрагмент, снимок Yandex Satellite (a). Распределение уклонов на современной и заброшенной пашне на водосборе балки, % от всей площади водосборного бассейна (b): 1 – залежь, 2 – пашня в старых границах, 3 – пашня в современных границах.

сравнению с предыдущим временным отрезком. Прирост площади пашни был незначительным, но существенные изменения произошли в пространственном положении границ пахотных угодий. Это обстоятельство требует разъяснений. Характерной особенностью исследуемого региона было быстрое и массовое земледельческое освоение. К концу XVIII в. распаханность бассейна р. Локны составляла 79%, т.е. с учетом площади, занятой долинно-балочной сетью (11%), селитебными территориями и лесами (10%), освоены были все пахотнопригодные участки. Дальнейшее расширение запашки могло происходить только за счет сведения немногочисленных лесов и освоения неудобий. По литературным источникам установлено, что после реформы 1861 г. при наделении крестьян землей были частично распашаны борта долинной сети. Как упоминалось выше, не было уверенности, что масштаб и способ отображения рельефа и границ пахотных угодий на Военно-топографической карте позволяет точно оценить площадь распашанных крутосклонных участков. Сохранившиеся на склонах долинной сети в бассейне р. Локны старые напашки предположительно маркируют нижние границы пореформенных крестьянских наделов. Для проверки достоверности оценки площади и пространственного расположения пахотных участков по измерениям на Военно-топографической карте и влияния распашки бортов малых

долин на общий объем потерь почвы было проведено моделирование интенсивности эрозии в пределах части крупной балочной системы Часовенков верх (левый приток Локны с площадью водосбора около 40 км<sup>2</sup>) для двух вариантов расположения нижней границы пашни: на бортах малой долины по очертаниям старых напашей, которые были дешифрированы по космоснимкам (рис. 2a), и выше бровки долины. Расчеты показали, что смещение границ полей уменьшает общую площадь пашни на водосборе Часовенкова верха на 2%, однако при этом из оборота выводятся наиболее крутосклонные и эрозионноопасные участки (рис. 2b). Общий объем смыва, рассчитанный при одних и тех же величинах остальных входных параметров модели, сократился на 9%. Полученные результаты показали хорошую сходимость с расчетами для всего бассейна р. Локны, основанными на измерениях по Военно-топографической карте.

Достоверность полученных расчетных результатов определяется точностью реконструкции входных параметров модели и надежностью самой модели. Верификация WaTEM/SEDEM в условиях России только начинается, однако уже получены хорошие результаты сравнения расчетов по модели с данными полевых методов оценки эрозии: радиоцезиевого, почвенно-морфологического и магнитного трассера [10, 64].

**Таблица 3.** Вариабельность факторов эрозии, темпов и объемов смыва почвы в бассейне р. Локна за рассматриваемый период

Параметр	<i>R</i>	<i>C</i>	<i>K</i>	Распаханность, %	Темпы смыва, т/га в год	Объем смыва, тыс. т в год
Минимум	227	0.29	47	51	5.4	49
Максимум	312	0.45	61	81	11.3	163
Коэффициент вариации, %	11.5	18.3	6	14.6	23.9	36.2
Превышение максимума над минимумом	1.4	1.6	1.3	1.6	2.1	3.3

Литературные данные по суммарному смыву почвы от дождевых и талых вод для исследованного региона крайне немногочисленны и имеют для отдельных периодов. Так, по данным карты “Эрозионная опасность сельскохозяйственных земель европейской части СССР” [23], созданной в начале 80-х гг. прошлого века на базе расчетов по адаптированной к условиям России модели ливневой эрозии USLE и переработанной модели талого смыва ГГИ [22], средняя величина смыва для Тульской области в целом была 7.5 т/га в год, при этом доля талого смыва составляла около 15%. С целью корректного сравнения для периода 1980–1993 гг. были дополнительно рассчитаны темпы и объемы талого смыва. Согласно нашим расчетам с реконструированными для этого периода входными параметрами модели получены средние темпы суммарного смыва в бассейне р. Локна 9.2 т/га в год, на долю талого смыва приходится около 8.5%. Величины суммарного смыва представляются вполне сопоставимыми с учетом неоднородности природных условий Тульской области и особенностей алгоритмов расчета моделей. Почти двукратная разница в оценке доли талого смыва, возможно, связана с некоторым различием климатических условий юга и севера Тульской области, что отразилось на величине запасов воды в снеге к началу весеннего снеготаяния, согласно расчетам, проведенным в середине 1980-х гг. для всех сельскохозяйственных земель СССР на основании обработки данных 30-летних рядов наблюдений по 860 метеостанциям [25].

В исследованиях на одном из малых водосборов в бассейне р. Локна в середине 1990-х гг. с использованием той же модели эрозии [22] получена расчетная интенсивность суммарного смыва на пашне 7–10 т/га в год [62]. Проведенные расчеты суммарного смыва отдельно для этого водосбора дали среднюю величину 8.8 т/га в год, которая укладывается в указанный интервал.

Надежной проверкой результатов моделирования смыва в предшествующие эпохи с использованием реконструированных значений основных факторов эрозии может служить только

сравнение с фактическими величинами смытости почв. Получение достаточного объема полевых данных о строении почвенных профилей на большой площади – задача чрезвычайно трудоемкая. К настоящему времени пространственно-временная верификация моделей эрозии ливневого (WaTEM/SEDEM) и талого смыва на основе полевых данных, полученных почвенно-морфологическим и радиоцезиевым методами, проведена на одном из малых балочных водосборов площадью 0.96 км<sup>2</sup>, расположенном в центральной части бассейна р. Локны [64]. Полевые методы имеют собственные погрешности, связанные, например, с выбором эталона при определении степени редукции почвенных горизонтов. На малом водосборе в бассейне р. Локна диапазон погрешностей определения эрозионных потерь полевыми методами варьировал от 5 до 40%. Расхождение между средними оценками эрозионных потерь почвы, полученными путем моделирования и при помощи радиоцезиевого метода, составило 5%, с оценками почвенно-морфологическим методом – 20%. Таким образом, различия между средними оценками эрозионных потерь, полученными при моделировании, оказались в пределах погрешности полевых методов.

Для всего бассейна р. Локны был проведен анализ полученных исторических изменений факторов и скоростей эрозии (табл. 3).

Коэффициент вариации фактора *K* при современной степени смытости почв составляет 6%. Вероятно, в самом начале земледельческого освоения бассейна р. Локна он был еще меньше, поскольку длительное воздействие эрозионно-аккумулятивных процессов приводит к увеличению дифференциации почвенного покрова.

Коэффициент вариации значений распаханности территории бассейна за весь рассматриваемый временной отрезок составляет около 15%, причем в основном за счет процесса сокращения площадей пашни начиная с середины XX в. В силу специфики характера земледельческого освоения территории коэффициент вариации площади пашни с конца XVIII в. до середины 1960-х гг. не

превышал 6%. Наиболее значительные изменения отмечены для коэффициента почвозащитной роли растительности  $C$  (коэффициент вариации 18.3%), что отражает динамику состава практикуемых севооборотов за весь период. Коэффициент вариации фактора  $R$  составил 11.5%. Расчет проводили для периода с начала 1940-х гг., поскольку с конца XVIII в. до середины XX в. величину  $R$  принимали постоянной. Сравнение темпов смыва в периоды 1941–1965 и 1965–1980 гг., когда противоэрозионная способность агроценозов и площадь пашни были неизменными, а эрозионный потенциал осадков увеличился на 16%, показало рост интенсивности эрозии и объемов смыва на 15%. Можно предположить, что это увеличение скорости эрозии почв произошло преимущественно за счет изменения климатического фактора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ собранных литературных и архивных данных позволил установить, что массовое земледельческое освоение исследуемого региона началось не ранее середины XVII в. и было стремительным – за 200 лет было распахано более половины территории бассейна р. Локны. Сравнение данных официальной статистики по динамике пахотных угодий в Крапивенском и Чернском уездах Тульской губернии и результатов собственных измерений площади пашни в бассейне р. Локна по планам ГМ и Военно-топографической карте показало их хорошую сходимости, что позволяет использовать данные исторические документы в целях реконструкции пространственного положения и площади пахотных угодий.

Состав посевных культур и системы земледелия на исследуемой территории оказались очень консервативными величинами: трехполье в незначительно модифицированном виде сохранялось вплоть до 30-х гг. XX в., рожь являлась основной озимой культурой до середины 1970-х гг.

Анализ изменений основных факторов эрозии и расчетных показателей интенсивности смыва почвы показал отсутствие постоянных однонаправленных трендов в течение исследуемого периода. Тенденция сокращения площади пашни, наблюдавшаяся с середины XX в., в последние годы сменилась небольшим ростом. Наиболее сильно на темпы мобилизации материала влияла не величина пахотного клина, как таковая, а характер распределения участков пашни по основным элементам рельефа. Небольшой прирост распаханности за счет освоения бортов долинной сети после реформы 1861 г. при незначительных изменениях прочих факторов эрозии привел к непропорциональному увеличению темпов и объемов смыва. На протяжении исследованного периода максимальная величина коэффициента вариации при-

родных факторов эрозии не превысила 18.3%, при этом темпы и объемы смыва трансформировались значительно сильнее – коэффициенты вариации составили 24 и 36% соответственно, а диапазон изменений – от 2.1 до 3.3 раз.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФН (проект № 22-27-00170).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Динамика распаханности на протяжении исследуемого периода, % от площади.

Рис. S1. Соотношение групп полевых культур и значения  $C$ -фактора для выделенных периодов освоения в бассейне Локны.

Рис. S2. Темпы ливневого смыва на разных этапах освоения бассейна р. Локны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Тульского наместничества со статистическими замечаниями. Рукопись. ЦГВИА, 1784. № 19121.
2. *Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И.* Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18010069>
3. Бассейн Дона. Водосборы Непрядвы, Мокрой и Сухой Табол и правой стороны Дона до впадения р. Красивой Мечи. Исследования лесоводственного отдела 1898 г. // Тр. экспедиции для исследования источников главнейших рек Европейской России. М.: Тип. Товарищество И.Н. Кушнерев и К, 1904. Т. XXXIV. 182 с.
4. *Болотов А.Т.* О разделении полей // Тр. Вольного экономического общества. 1771. Ч. XVII. С. 48–168.
5. *Брызжев А.В., Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Организация ретроспективного мониторинга почвенного покрова и земель Азовского района Ростовской области // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1294–1315. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13110026>
6. *Водарский Я.Е.* Дворянское землевладение в России в XVII–первой половине XIX в. (Размеры и размещение). М.: Наука, 1988. 302 с.
7. Военно-статистическое обозрение Российской империи. Т. VI. Ч. 4. Тульская губерния [по рекогносцировкам и материалам, собр. на месте, сост. Гвоздев]. СПб.: Тип. Деп. Ген. Штаба, 1852. 168 с.

8. Генеральный геометрический план Тульского наместничества города Черни и его уезда. Сочинен в Тамбовской межевой конторе в 1792 г.
9. Главнейшие данные поземельной статистики по обследованию 1887 г. (Статистика Российской империи). Вып. 44. Тульская губерния. СПб., 1899. 42 с.
10. *Голосов В.Н., Жидкин А.П., Петелько А.И., Осипова М.С., Иванова Н.Н., Иванов М.М.* Полевая верификация эрозионных моделей на основе исследований малого водосбора в бассейне р. Воробжи (Курская область) // Почвоведение. 2022. № 10. С. 1321–1338.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22100045>
11. *Гомте Ю.В.* Замосковский край в XVII веке: Опыт исследования по истории экономического быта Московской Руси. М.: Тип. Г. Лисснера и Д. Собко, 1906. 603 с.
12. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2014 г. М.: Росинформагротех, 2016. 188 с.
13. Доклад об экологической ситуации в Тульской области за 2021 г. <https://ekolog.tularegion.ru>.
14. *Дорофеев В.Ф., Бараш С.И., Наскидашвили П.А., Самадашвили Ц.Ш.* Урожайность яровой пшеницы в СССР (1918–1980) // Науч.-техн. бюл. ВИР. 1984. № 142. С. 67–80.
15. *Дорофеев В.Ф., Бараш С.И., Наскидашвили П.А., Самадашвили Ц.Ш.* Урожайность яровой пшеницы в Европейской России (1800–1917 гг.) // Науч.-техн. бюл. ВИР. 1984. № 142. С. 62–66.
16. *Каишаров М.* Статистический очерк хозяйственного и имущественного положения крестьян Орловской и Тульской губерний. СПб.: Типография Киришбаума, 1902. 83 с.
17. *Каиштанов А.Н., Лисецкий Ф.Н., Швец Г.И.* Основы ландшафтно-экологического земледелия. М.: Колос, 1994. 127 с.
18. *Кириков С.В.* Человек и природа восточно-европейской лесостепи в X–XIX вв. М.: Наука, 1979. 184 с.
19. *Козлов В.П.* К изучению эрозии почвы на западных и южных склонах Среднерусской возвышенности // Материалы по изучению процессов почвенной эрозии и плодородия смывных почв. М.: Изд-во АН СССР, 1953. С. 118–210.
20. *Костин С.* Обзор местной погоды за 1925 год (По данным Тульской метеорологической станции при 1-х Тульских оружейных заводах) // Тульский край: краеведческий журн. 1926. № 1. С. 68–70.
21. *Кузнецов М.С., Литвин Л.Ф., Ким А.Д., Демидов В.В., Флэсс А.Д., Есафова Е.Н.* Оценка опасности эрозии почв в загрязненных районах Тульской области // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1994. № 3. С. 17–29.
22. *Ларионов Г.А.* Эрозия и дефляция почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 199 с.
23. *Ларионов Г.А., Белоцерковский М.Ю.* Карта “Эрозионная опасность сельскохозяйственных земель европейской части СССР”. М 1 : 2000000. М., 1987.
24. *Литвин Л.Ф., Кирихина З.П., Краснов С.Ф., Добровольская Н.Г.* География динамики земледельческой эрозии почв на европейской территории России // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1390–1400.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17110089>
25. *Литвин Л.Ф.* География эрозии почв сельскохозяйственных земель России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 255 с.
26. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX в. и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 415 с.
27. *Мельшиян В.В.* Тульская область. Экономико-географический очерк. Тула: Тульское кн. изд-во, 1959. 238 с.
28. Народное хозяйство Тульской области. Статистический сборник. Тула: Тульское книжное издательство, 1958. 216 с.
29. *Нехаев В.В.* Сельское хозяйство Тульской области – исторические факты и современность // Концепт. 2016. Т. 5. С. 23–27.
30. Обзор Тульской губернии. Приложение ко всеподданейшему отчету тульского губернатора за 1873 г. Литография. Тула, 1874. 125 с.
31. *Парамонова И.Ю.* Тула. XX век: подробности. Тула: Дизайн коллегия, 2008. 255 с.
32. Посевные площади СССР (по административным районам). Итоги учета посевных площадей летом 1935 года. М.: ЦУНХУ Госплана СССР, в/о Союзоргучет, 1936. 405 с.
33. *Постников А.В.* Развитие картографии и вопросы использования старых карт. М.: Наука, 1985. 214 с.
34. Поуездные итоги Всероссийской сельско-хозяйственной и Поземельной переписи 1917 г. по 57 губерниям и областям. Тр. центрального статистического управления. Т. V. Вып. 2. М., 1923. 218 с.
35. *Ратников А.И.* Геоморфологические и агропочвенные районы Тульской области // Почвенное районирование СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. С. 92–115.
36. Россия. Полное географическое описание нашего отечества: настольная и дорожная книга для русских людей / Под ред. Семенова В.П. Т. 2. Среднерусская Черноземная область (Курская, Орловская, Тульская, Рязанская, Тамбовская, Воронежская и Пензенская губернии). СПб.: Типография А.Ф. Девриен, 1902. 717 с.
37. *Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Влияние лесополос на фрагментацию овражно-балочной сети и образование мочаров // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1293–1307.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14110094>
38. *Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Анализ применения почвенных карт в системе ретроспективного мониторинга состояния земель и почвенного покрова // Почвоведение. 2015. № 5. С. 605–625.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X15050081>
39. *Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В.* Ретроспективный анализ изменчивости землепользования

- на слитых почвах замкнутых западин Приазовья // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1168–1194. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15100093>
40. Рухович Д.И., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Черноусенко Г.И., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Влияние засоленных почв на изменчивость типов землепользования в Азовском районе Ростовской области // Почвоведение. 2017. № 3. С. 289–310. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17010130>
  41. Скобеев Н.М. Новейшие тенденции в изменении землепользования и специфика их учета на примере Тульской области // Региональные исследования. 2017. № 4. С. 81–92.
  42. Сумароков П.И. Прогулка по 12 губерниям с историческими и статистическими замечаниями в 1838 г. СПб.: Типография А. Сычева, 1839. 534 с.
  43. Тульский статистический ежегодник 2018. Статистический сборник. Тула, 2019. 294 с.
  44. Федотов В.И., Васильев В.М. Земля тульская: (Природа, ландшафты и их охрана). Тула: Приокское книжное издательство, 1979. 222 с.
  45. Флëсс А.Д. Миграция радиоцезия чернобыльского выброса с продуктами эрозии почв. 2. Изучение влияния почвенных свойств на содержание Cs-137 в почвах и продуктах эрозии // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1998. Т. 3. С. 28–31.
  46. Экосистемы и благосостояние человека: синтез. Доклад международной программы. <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.791.aspx.pdf>
  47. Яковлев А.И. Засечная черта Московского государства в XVII веке: очерк из истории обороны южной окраины Московского государства. М.: Типография Г. Лиснера и Д. Совко, 1916. 321 с.
  48. Vascova M., Krasa J. Application of historical and recent aerial imagery in monitoring water erosion occurrences in Czech highlands // Soil and Water Research. 2016. V. 11. P. 267–276. <https://doi.org/10.17221/178/2015-SWR>
  49. Baude M., Meyer B.C., Schindewolf M. Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil based ecosystem services // Sci. Total Environ. 2019. V. 659. P. 1526–1536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.455>
  50. Cook E.R., Solomina O., Matkovsky V., Cook B.I., Agafonov L., Dolgova E., Karpukhin A. et al. The European Russia Drought Atlas (1400–2016 CE). // Climate Dynamics. 2020. № 54. P. 2317–2335. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05115-2>
  51. Devaty J., Dostal T., Hosl R., Krasa J., Strauss P. Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion – Case studies from Lower Austria and Central Bohemia // Land Use Policy. 2019. V. 82. P. 674–685. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.058>
  52. Fan J.R., Chen Y., Yan D., Guo F.F. Characteristics of rainfall erosivity based on tropical rainfall measuring mission data in Tibet, China // J. Mountain Sci. 2013. № 10. P. 1008–1017. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2378-1>
  53. Kijowska–Strugala M., Bucala–Hrabia A., Demczuk P. Long-term impact of land use changes on soil erosion in an agricultural catchment (in the Western Polish Carpathians) // Land Degradation Development. 2018. <https://doi.org/10.1002/ldr.2936>
  54. Kim S.M., Jang T.I., Kang M.S., Im S.J., Park S.W. GIS-based lake sediment budget estimation taking into consideration land use change in an urbanizing catchment area // Environ. Earth Sci. 2014. V.71. P. 2155–2165. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2621-7>
  55. Krasa J., Dostal T., Vrana K., Plocek J. Predicting spatial patterns of sediment delivery and impacts of land-use scenarios on sediment transport in Czech catchments // Land Degradation Development. 2010. V. 21. P. 367–375. <https://doi.org/10.1002/ldr.959>
  56. Latocha A., Szymanowski M., Jeziorska J., Roszczewska M., Stec M. Effects of land abandonment and climate change on soil erosion – An example from depopulated agricultural lands in the Sudetes Mts., SW Poland // Catena. 2016. V. 145. P. 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.027>
  57. Ranzi R., Le T.H., Rulli M.C. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): Effects of reservoirs and land use changes // J. Hydrology. 2012. V. 422–423. P. 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.009>
  58. Van Loo M., Duser B., Verstraeten G. et al. Human induced soil erosion and the implications on crop yield in a small mountainous Mediterranean catchment (SW-Turkey) // Catena. 2017. V. 149. P. 491–504. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.023>
  59. Van Oost K., Govers G., Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage // Landscape Ecology. 2000. V. 15. P. 577–589. <https://doi.org/10.1023/A:1008198215674>
  60. Van Rompaey A., Verstraeten G., Van Oost K., Govers G., Poesen J. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. V. 26. P. 1221–1236. <https://doi.org/10.1002/esp.275>
  61. Van Rompaey A., Krasa J., Dostal T. Modelling the impact of land cover changes in the Czech Republic on sediment delivery // Land Use Policy. 2007. V. 24. P. 576–583. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.10.003>
  62. Walling D.E., Golosov V.N., Panin A.V., He Q. Use of radiocaesium to investigate erosion and sedimentation in areas with high levels of Chernobyl fallout // Tracers in Geomorphology / Ed. Foster I.D.L. Chichester: Wiley & Son, 2000. P. 183–200.
  63. Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dostal T., Yurova A., Krasa J. A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow region) // Int. Soil Water Conservation Res. 2022. V. 10. P. 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>
  64. Zhidkin A., Gennadiev A., Fomicheva D., Shamshurina E., Golosov V. Soil erosion models verification in a small catchment for different time windows with changing cropland boundary // Geoderma. 2023. V. 430. P. 116322. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116322>

## Retrospective Analysis of Agricultural Development History and Evaluation of Soil Erosion Rates within the Lokna River Basin, Tula Region

N. N. Ivanova<sup>1</sup>, D. V. Fomicheva<sup>2</sup>, D. I. Rukhovich<sup>2</sup>, and E. N. Shamshurina<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

\**e-mail: shamshyr@mail.ru*

According to literary and archival data, the dynamics of the Tula region/province plowing as a whole, and its individual parts are revealed. It is established that the agricultural development of southern part of the modern Tula region began in the middle of the XVII century. According to the maps of different years of creation, changes in the area of arable land in the Lokna river basin (Plavsk district of the Tula region) from the end of the 18 to the present are determined. The reliability of the values of ploughing of the territory obtained by instrumental methods is confirmed by literature data. The composition of field crops and changes in farming systems during the period under review were reconstructed, significant conservatism of these indicators was revealed: the fallow three-field dominated throughout the XIX and the first half of the XX centuries, the predominance of rye in winter crops and oats in spring crops remained until the 1970s. According to the WaTEM/SEDEM, using historical data on the change in the main erosion factors as input parameters, the intensity and volume of rainfall run-off for the selected stages of agricultural development of the Lokna river basin were calculated. In order to compare the results with the literature data for the period 1980–1993 yr the snowmelt soil erosion rates were additionally calculated. The reliability of the obtained estimates for the last 40–50 years is confirmed by the literature data. It is established that the maximum plowing and intensity of the manifestation of erosion processes in the Lokna river basin was observed in the last quarter of the XIX–early XX centuries. The influence of the arable land location relative to the relief elements on the rates and volumes of run-off is revealed.

*Keywords:* arable land area, crop rotations, retrospective modeling of rainfall erosion, WaTEM/SEDEM, Luvic Chernic Phaeozems, Luvic Greyzemic Chernic Phaeozems