

УДК 504.54.05+504.54.062+551.43

*Е.А. Шынбергенов, О.П. Ермолаев*

## **ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВ БАССЕЙНА р. ЛЕНА**

Приводится методика оценки потенциальной потери почвы в бассейне одной из Великих рек России – р. Лена с использованием географических информационных систем. Выбранный уровень генерализации соответствует региональному (1:1 000 000). Впервые для территории столь больших размеров, расположенной в восточной части Сибири, создана геобаза данных на основе бассейнового подхода для расчета эрозии почвы. В качестве модели рельефа для расчета величин смыва взята глобальная ЦМР «GMTED2010» и слой гидросети, соответствующий масштабу 1:1 000 000. Подробно рассматривается формирование геобазы данных, которая построена по принципу мультипликативной структуры, где отражаются основные параметры рельефа (уклон, экспозиция, длина склонов, эрозионный потенциал рельефа), почвы, климатических характеристик и современных типов земного покрова. На количественном уровне с достаточно высокой степенью пространственной детализации получены результаты по расчету потенциального смыва почв. Средняя величина потенциального смыва почв в бассейне без учета фактора типов земного покрова составила 23,6 т/га. Проведенные расчеты с учетом типов земного покрова, полученных по данным дистанционного зондирования из космоса, дали существенное, на порядок, уменьшение величин смыва почв (0,04 т/га). Благодаря высокой доле лесистости и низменному характеру территории левобережной части бассейна реки Лены доминируют ничтожные величины смыва почв. На эту категорию приходится около 50 %. Небольшой и умеренный смыв почв наблюдается на половине территории бассейна, а очень значительный – менее 0,05 %.

*Ключевые слова:* река Лена, морфометрический анализ рельефа, почвы Сибири, типы землепользования, потенциальный смыв почвы.

Территориальное развитие Сибири и Дальнего Востока, обозначенное в планах Правительства РФ, предопределяет научное обоснование проектов по хозяйственному освоению и прогнозированию антропогенного воздействия. Здесь протекают крупнейшие реки России (Обь, Енисей, Лена, Амур и др.), бассейны которых все еще недостаточно географически хорошо изучены. Территориальный анализ географических объектов и явлений удобнее всего осуществлять на основе бассейнового подхода. [1; 2]. Это касается и такого процесса, как эрозия.

Глобальные изменения природной среды и возрастающая нагрузка на территории определяет масштабное антропогенное преобразование условий формирования стока наносов и веществ [3; 4]. Изменение ее отдельных компонентов определяется как процессами на водосборе, связанными с потоками загрязняющих веществ от объектов промышленных и горнорудных предприятий, сельскохозяйственных систем, так и точечным сбросом сточных вод и загрязнением от расположенных в пределах речных долин объектов. Дискретность единого эрозионно-аккумулятивного процесса определяет исключительную сложность подходов к численному моделированию процессов формирования и перемещения стока наносов, связанную с большой пространственной вариабельностью их факторов, для учета которых требуются значительные информационные пространственно-распределенные ресурсы.

Работы по расчету потенциального смыва в пределах бассейнов различного порядка средствами ГИС-технологий широко распространены как за рубежом, так и в России [5-10]. Актуальность подобных расчетов по-прежнему существует, определяясь не только большими региональными различиями в характеристиках параметров, но и выбранным уровнем генерализации расчетной эрозионной модели. Обзор публикаций по речным бассейнам Сибири показал отсутствие систематизации работ по данной тематике, имеются исследования по определению многолетней динамики водного баланса; почвенно-эрозионных процессов лишь в отдельных бассейнах рек Селенги, Томи, Оби, Иркута [11-15]. На территорию Сибири, расчеты по определению смыва почв с локального бассейна с помощью ГИС-технологий рассматриваются в исследованиях Ю.В. Рыжова и Р.В. Кнауб [11; 15]. Современные возможности ГИС-технологий, обобщенные в виде геопространственной базы данных или геоинформационной системы, привязанной к бассейнам рек, открывают новые возможности моделирования эрозии и стока наносов для столь крупных речных бассейнов, каким является бассейн реки Лены.

Водосбор р. Лена, среди крупных и относительно слабо измененных хозяйственной деятельностью речных бассейнов, в гидролого-геоморфологическом плане относительно хорошо изучен, особенно в отношении изменчивости стока воды [16; 17]. Хорошо изучен гидрологический и гидрохимический режим дельты и некоторых участков русловой сети в среднем течении [18]. В последние годы в

бассейне была выполнена настройка бассейновой модели формирования стока Ecomag, выполнены тестовые расчеты реакции водного стока на климатические изменения. Ряд региональных работ был посвящен особенностям миграции вещества в устьевой части бассейна в рамках реализации российско-немецких проектов, в частности на станции «Самойловский» в дельте р.Лена, в рамках проектов Министерства науки и образования Германии (BMBF) OSL-11-02 *Substantial flow transformation processes in the Lena river delta* и OSL-12-01 *The study of geochemical processes of the Lena River delta*. Оценка роли речного транспорта в латеральном потоке взвешенного органического углерода в системе «суша-шельф» [19], по сравнению с ролью разрушения морских берегов, сложенных ледовым комплексом; оценки содержания органического углерода (ОУ), составляющие в пределах от 1–5 % в древнейших отложениях у подошвы ледового комплекса, до 50 % в голоценовых торфяниках.

В бассейне реки Лены ранее выполнялись оценки по изменению основных характеристик стока воды, наносов и температуры воды Вилюя, средней и нижней Лены, вклада в него климатического и антропогенных факторов; по изменению температуры воздуха и осадков; по водохозяйственной деятельности в бассейне; по трансформации стока на участке Якутск-Кюсюр, Кюсюр-море и, отдельно, в дельте, с распределением стока по рукавам дельты. Начиная с середины 70-х годов XX века и по настоящее время, осуществляется мониторинг состояния русла в пределах среднего течения (между устьевыми участками рр. Витим и Вилюй), в рамках которого проводятся систематические измерения расходов воды в пределах разветвленных участков, сплошные батиметрические съемки русла, составление карт руслообразующих наносов. Такой продолжительный период мониторинговых наблюдений, а также ретроспективный анализ имеющегося картографического материала за последние 150 лет, позволил выявить многолетние и вековые циклы развития наиболее крупных русловых образований р. Лена. Установить связь с ними сезонного и многолетнего режима крупных грядовых форм руслового рельефа (перекатов), интенсивности и направленности горизонтальных русловых деформаций, разработать прогнозы развития русла в пределах селитебных территорий, подверженных негативному воздействию гидрологических и русловых процессов. В последние годы были выполнены наблюдения за развитием термоэрозии в пойменных берегах [20].

В то же время эрозионные процессы (сток взвешенных и генезис речных наносов, эрозия почв бассейна), их пространственная структура и состав, систематически не исследовались. Обобщение сетевых наблюдений за стоком наносов, единственная основа для калибровки моделей выноса материала в речную сеть, выполнялись в ряде обобщающих исследований [21–24]. Сравнение данных по замыкающим створам рек, впадающих непосредственно в моря Российской Арктики, показывает, что среди них р. Лена отличается наибольшим стоком взвешенных наносов, оцениваемым разными авторами в интервале от 17,6 млн т/год [22] до 21,87 млн т/год [21] (табл. 1).

Таблица 1

**Оценки стока взвешенных наносов в вершине дельты р. Лены, млн т/год**

Магрицкий, 2010	Дедков, Можерин, 2004	Gordeev, 1996	Чалов и др., 2000
21,4/0,03	21,87	17,6	20,7
1936, 1944, 1960-1981, 1983-2000	До 1983	н/д	н/д

В России, в том числе и в ее азиатской части ранее не проводилось работ по оценке смыва почв в бассейнах крупных и великих рек.

В связи с этим цель данного исследования - количественная оценка потенциального смыва почв в бассейне реки Лены. Задачи исследования включали выбор расчетной модели потенциального смыва, подбор исходных материалов, перевод их в геоинформационную базу данных и расчет потенциального смыва почв в бассейне.

**Обзор существующих моделей смыва почв.** Моделирование поступления вещества в речную сеть с водосбора (то есть для твердого вещества – эрозионных процессов), представляет собой количественное описание и прогнозирование изменений во времени координат поверхности контакта текучей воды и грунта, а также величины транспорта наносов и оценку итоговой результирующей величины этих процессов. Разработка математических моделей водной эрозии началась в 30–40 гг. XX в., которые развивались на основе различных формул расчета или прогноза. В настоящее время существует большое количество зависимостей, используемых при расчетах поверхностного смыва почвы. Так, из зарубежных моделей можно отметить наиболее часто употребляемые зависимости USLE, MUSLE, RUSLE,

EROSION 2D/3D, EUROSEM, USPED, USLE-M, RUSLE-3D и пр. Отечественные и постсоветские модели представляют формулы Г.И. Швобса, Ц.Е. Мирцхулавы, И.К. Срибно, Г.П. Сурмача, А.А. Светличного, Х. Митасовой и Л. Митаса, Ю.П. Сухановского, ГГИ и др., значительная часть которых приведена в монографии Ф.Н. Лисецкого [25]. За рубежом встречаются попытки классифицирования существующих моделей: двухуровневые (эмпирические и физически обоснованные), трехуровневые (эмпирические, физически обоснованные и концептуальные) [25; 26].

Большинство моделей смыва почв при расчетах эрозионного потенциала рельефа делают акцент на LS-фактор (длина и крутизна склонов), при этом методика проведения исследования может быть разной [9; 25; 26]. При бассейновом подходе обобщение опыта моделирования стока наносов и сопутствующих химических элементов позволяет выделить разные классы моделей. Наиболее детально вопросы классификации бассейновых моделей проработаны применительно к эрозионным процессам [26], для которых по характеру описания моделируемого процесса предложено выделять эмпирические, теоретические и концептуальные модели [25]. Использование того или иного класса определяет возможности прогнозирования потоков химических элементов в реках.

### Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран водосборный бассейн р.Лена (рис. 1). Бассейн р.Лена входит в состав арктического водосбора азиатской части России, в административном отношении расположен в пределах Сибирского, Дальневосточного ФО РФ. Водосборная площадь р.Лена в большинстве справочной литературы лежит в пределах 2,42-2,46 млн.км<sup>2</sup> [21; 27-31]. По площади водосбора Лена входит в число крупнейших рек Российской Арктики и мира (> 1 млн. км<sup>2</sup>) [32].

Бассейновые источники поступления наносов в этом крупном водосборе России практически не исследовались. В этой связи нами проведена работа по расчету потенциального смыва почв со склоновых поверхностей бассейна. Расчеты проводились на основе методов, относящихся к классу гидрофизических моделей. Использована модель смыва почв, рекомендованная лабораторией Эрозии почв и русловых процессов МГУ (НИЛЭПиРП), которая является модифицированной версией УУПП для условий России (сток дождевых осадков) и формулы смыва ГГИ (сток талых вод) [33].

Основные формулы, используемые при определении потенциального смыва почвы [34]:

Смыв от стока дождевых (ливневых) осадков:

$$C_L = D \cdot P \cdot P \cdot K_T, \quad (1)$$

где  $C_L$  – смыв от стока дождевых (ливневых) вод, т/га/год,  $D$  – эродирующая способность дождевых (ливневых) осадков (ЭПО),  $P$  – эродируемость почвы, т/га/ на единицу ЭПО,  $P$  – эродирующая способность рельефа,  $K_T$  – Почвозащитный коэффициент растительного покрова и агротехники.

Смыв от стока талых вод:

$$C_T = f \cdot (P \cdot h \cdot L \cdot I), \quad (2)$$

где  $C_T$  – смыв от стока талых вод, т/га/год,  $P$  – эродируемость почвы,  $h$  – слой поверхностного стока (запасы воды в снеге, осадки во время снеготаяния, коэффициент стока),  $L$  – длина склона, м.,  $I$  – крутизна склона.

Потенциальный смыв почвы, т/га/год:

$$C_{II} = C_L + C_T \quad (3)$$

Приводимые эмпирические зависимости, при проведении расчетов с использованием ГИС-средств, изменяются для вычислительной техники, подробное описание содержится в монографии [33].

Модель потенциального смыва почв, предложенная НИЛЭПиРП МГУ, основана на создании специализированной геоинформационной базы данных с использованием ГИС-средств, составленной из четырех блоков, так называемой мультипликативной структуры. В них интегрированы разные тематические факторы [34], все слои тематических карт представлены в виде точечных файлов (по сути они формируются на основе растровых сеток с определенным шагом), каждая точка имеет свою атрибутивную таблицу с параметрами, влияющими на эрозию почв. Преимуществом применения файлов точек, где каждой точке задаются отдельные параметры, является более детальное пространственное разрешение и вариабельность, по сравнению с геоморфологическими районами, когда в его пределах используется единый параметр, что приводит к существенной генерализации вносимых данных и получаемой информации о смыве. Пространственное разрешение файлов точек (растровой

сетки) с учетом принятого в исследовании уровня генерализации, обеспечивающего сомасштабность всех данных, составляет 250×250 м.

Для оценки факторов (предикторов) моделей эрозии использован набор картографо-геоинформационных инструментов (табл. 2). Именно этот картографо-геоинформационный инструментарий послужил основой для оценки фактора уклона и длины склонов (LS-фактор) и хозяйственно-агрономических факторов (С и Р факторы). Все операции производились в программном комплексе MapInfo 10.5 с использованием стандартных пакетов инструментов, а также пакетов ArcGIS 10.2.

Таблица 2

**Общее описание входных параметров и источников данных**

Тематический фактор	Параметр	Исходные материалы	Пространственное разрешение
Морфометрический анализ рельефа	Крутизна склонов Длина линий тока Экспозиция	ЦМР GMTED2010	250×250 м
Морфолого-генетические свойства почв	Номер и название почвы Содержание гумуса Класс по структуре Класс по водопроницаемости Коэффициент каменистости Доля частиц 0,1–0,05 мм от содержания фракции 0,25–0,05 мм Механический состав почв	Почвенная карта в векторном формате; Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (ЕГРПР РФ)	1:2 500 000
Климатические характеристики	Эрозионный потенциал ливневых осадков (ЭПО) Зона ЭПО Запасы воды в снеге	Данные с метеостанций Росгидромета ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»; Карта-схема «Районирование севера Евразии по внутригодовому распределению эрозионного потенциала осадков»	250×250 м
Почвозащитный коэффициент растительного покрова и агротехники	Типы использования земель	Карта типов земного покрова	230×230 м

**Морфометрический анализ рельефа.** Цифровые модели рельефа (ЦМР) можно разделить на две категории: открытого доступа и распространяемые на коммерческой основе. Нами использовались только открытые источники данных, включая и ЦМР.

Среди них привлекалась наиболее качественная для данного региона глобальная ЦМР GMTED2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) [35]. Подготовка модели рельефа достаточно подробно приведена в ряде публикаций [35-38]. Геопозиционирование производится на основе системы координат конической равноплощадной (равновеликой) проекции Альберса. Шаг сетки, используемой для представления исходных данных, проведения модельных расчетов и представления результатов, как ранее отмечалось, составляет 250×250 м, а общее число обрабатываемых ячеек в пределах границ водосбора р. Лена около 40 млн. Выбор такого размера ячейки можно считать оптимальным по следующим причинам. Во-первых, он достаточен для того, чтобы исключить большинство возможных топологических ошибок при переходе от векторной модели гидросети масштаба 1:1 000 000 к растровой. Во-вторых, позволяет обрабатывать растровые данные таких объемов современными вычислительными ресурсами и технологиями.

ЦМР построена тотально для всего бассейна, полностью обнаженного, т.е. условно не имеющего растительный покров, с тем чтобы можно было оценить возможный смыл почвы при сведении растительности [9].

На основе используемой модели рельефа GMTED2010 подготовлены растровые слои морфометрических характеристик рельефа: крутизна, экспозиция, длина линий тока. Операции проводились с использованием программного комплекса ARCGIS, где для расчетов применяется методика, приводимая в литературе [39]. Для минимизации искажений при вычислении морфометрических показателей использовалась равнопромежуточная проекция. Отметим, что прежде чем рассчитывать показатель длины линий тока, проводилась гидрологическая коррекция модели рельефа с целью удаления всех локальных западин.

**Эрозионный потенциал почв.** В качестве исходных данных привлекалась находящаяся в открытом доступе «Почвенная карта России». Она создана в векторном формате, в масштабе 1:2 500 000 Почвенным институтом В.В. Докучаева. На этой карте все полигональные объекты являются оцифрованными контурами почвенной карты РСФСР [40-42]. Описание данной карты получено из Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР РФ) [43]. Каждый полигон соответствует почвенному разрезу, к которому привязаны данные о почвенном покрове и почвообразующих породах, всего насчитывается более 240 почвенных параметров. Следует отметить, что кроме приводимого ресурса, нами были рассмотрены и изучены другие имеющиеся в открытом доступе материалы о почвенных ресурсах: FAO-UNESCO Soil Map of the World, FAO Map of World Soil Resources, Global Soil Regions Map, Harmonized World Soil Database, European digital archive on soil maps [44], чья пространственная и тематическая детальность, а также качество геопривязки оказались, как минимум, на порядок ниже. Используемая Почвенная карта, несмотря на некоторую генерализацию (1:2 500 000) в настоящее время является наиболее часто используемым источником очень качественных данных при проведении региональных географических исследований в России [45; 46].

Таблица 3

**Морфолого-генетические свойства почв**

№	Форма №2		ЕГРПР РФ	
	Поле	Описание данных	Поле	Описание данных
1.	Номер почвы		SoilID	Уникальный идентификатор почвы (номер выдела) по ПК РФ 1988
2.	Название почвы		RUSM	Название почвы по ПК РФ 1988
3.	Содержание гумуса		ORGMAT	Гумус, %
4.	Класс по структуре	Содержание агрегатов размером 0,25-1,0 мм., %, градация от 1 до 4 классов	TEXSCM	1-0,25 мм
5.	Класс по водопроницаемости	Скорость впитывания, мм./час, градация от 1 до 6 классов	WPM	Водопроницаемость
6.	Коэффициент снижения эродированности каменистостью	Состоит из 5 индексов, определяемых по степени покрытия камнями, %	GRVDEG, GRVCMP, TEXTSTNS	Степень каменистости, Состав минерального скелета, Каменистость
7.	Доля частиц 0,1-0,05 мм. от содержания фракции 0,25-0,05	Зависит от механического состава почвообразующей породы	PARGEN, PARCMP, GRSCMP	Генетический тип почвообразующей породы, Состав почвообразующей породы, Гранулометрический состав (аналитический)
			Гранулометрический состав, фракция:	
8.	Размер механических элементов, мм., и содержание фракций, %	1-0,25	TEXSCM	1-0,25 мм
9.		0,25-0,05	TEXTSAF	0,25-0,05 мм
10.		0,05-0,01	TEXTSIC	0,05-0,01 мм
11.		0,01-0,005	TEXTSIM	0,01-0,005 мм
12.		0,005-0,001	TEXTSIF	0,005-0,001 мм

*Примечание.* Форма №2 – База данных с основными параметрами почв, необходимых для определения эродированности почвы; ЕГРПР РФ – Единый государственный реестр почвенных ресурсов Российской Федерации.

База данных потенциального смыва почв содержит колонку «Индекс почв», где каждому индексу соответствует информация почвенного разреза, заполняемая в отдельную форму № 2, представленную в методических указаниях [34] и содержит 13 параметров: название почвы, содержание гумуса, класс строения, водопроницаемость, каменистость, гранулометрический состав, доля песка, норма смываемости и пр. Из представленных в ЕГРПР РФ 240 характеристик почв, нами используются данные приводимые в табл. 3.

Необходимо отметить, информация по почвам, указанная в ЕГРПР РФ, не является исчерпывающей для заполнения формы № 2 и последующих расчетов [34]. Поэтому производилась верификация вносимых данных по другим источникам [47]. Это главным образом касалось параметров водопроницаемости почвы [48; 49].

По данным Почвенной карты в бассейне р. Лена находится 78 подтипов почв. В последующем ряд из них были исключены из расчета смыва по причине фактического отсутствия на них эрозии в силу пространственного положения в бассейне. Это коснулось 8 подтипов почв: торфяные болотные верховые, переходные, низинные, (без разделения); торфянисто- и торфяно-глеевые болотные (глееземы торфянистые и торфяные болотные). Выделены с почвенной карты также области, относящиеся к непочвенным образованиям; каменистые россыпи; пески; и водные объекты [40; 41; 43]. Эти подтипы почв и непочвенных образований в последующем были забланкованы на карте бассейна р. Лена.

**Климатические характеристики.** В настоящее время в России функционируют несколько ресурсов специализированных массивов климатических данных. Среди них данные открытого доступа по метеостанциям Росгидромета предоставляют ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Мировой центр данных), г. Обнинск (<http://www.meteo.ru>) и компания «Расписание погоды» (г. Санкт-Петербург, данные с 2005 г. (<https://rp5.ru>)) [50; 51]. Для определения климатических показателей использованы данные «ВНИИГМИ-МЦД»: координаты метеостанций [52]; температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные) [53]. Все метеостанции, в количестве 48 шт., нанесены на карту водосбора реки Лены. В качестве дополнительных материалов для расчета смыва также привлекались опубликованные картографические материалы (эрозионный потенциал осадков, внутригодовое распределение (зоны) ЭПО [33] и рукописная карта запасов воды в снеге, любезно предоставленная сотрудниками НИЛЭПиРП. Эти карты были оцифрованы в программном продукте MapInfo, с последующей растеризацией, построением точечных файлов в ГИС-среде ArcMap. Данные карты характеризуют увлажнение территории в конце прошлого столетия и, наверное, надо бы использовать более современные данные об эрозионном потенциале дождей, изменениях в запасах воды в снеге. Однако в силу разных причин в настоящий момент таких современных карт не существует на данную территорию. На фоне происходящих климатических изменений в пределах территории России [54] по анализу многолетних трендов осадков (1976–2010 гг.) установлено увеличение очень сильных (опасных) дождей. В то же время отмечается, что это может происходить на очень локальных территориях. Кроме того, данному явлению свойственно колебание в широких диапазонах интенсивности в определенный промежуток времени. Так, например, на территории Сибири с 2003 г. происходил интенсивный рост количества опасных дождей, начиная с 2008 г. данное явление сменилось убыванием их количества, а с 2013 г. снова отмечено их возрастание [55]. Потепление климата, происходящее на большей части северных территорий России, способствует разрушению верхних горизонтов многолетней мерзлоты, вместе с тем повышение доли ливневых осадков приводит к формированию эрозионных процессов, ощутимых в горных типах поверхности, свойственных Дальневосточному региону, югу и востоку Сибири.

В литературе [56] имеются модельные данные по эрозионному индексу дождевых осадков ( $R_{30}$ ) для Северного Поволжья, полученные по современным данным. Авторы допускают использование этих значений для Северной Евразии. Мы также попытались экстраполировать данную модель эрозионного потенциала осадков на бассейн р. Лена. В итоге результирующий слой показал двукратное завышение ЭПО на севере и трёхкратное на юге по сравнению с ранее опубликованными данными [33]. В связи с этим, принято решение использовать уже существующую модель ЭПО, опубликованную в виде карты-схемы «Районирование севера Евразии по внутригодовому распределению эрозионного потенциала осадков» [33]. Для территории бассейна р. Лена была проведена оцифровка карты для построения растрового слоя ЭПО. Учитывалось, что сток не образуется при выпадении дождя слоем < 10 мм, поскольку такой слой считается равным водоудерживающей способности почвы, лишённой растительного покрова [57; 58].

Распределение снежного покрова на территории России классифицируется по климатическим квазиоднородным районам, на основе данных маршрутных снегосъемок по метеостанциям. В бассейне р. Лена выделяются 3 таких района: Северная часть Восточной Сибири и Якутии; Центр и юг Восточной Сибири; Дальний Восток [59]. По другим данным [60] выделяется 5 районов: Сибирский; Восточная Сибирь (центральная часть, бассейн Ангары, Забайкалье); Дальний Восток между 50 и 60° с.ш. Существует тенденция (1966-2010 гг.) изменения максимальных за зиму запасов воды в снеге в Центральном районе Восточной Сибири (увеличение до 3,4 %) и уменьшения продолжительности залегания снежного покрова на востоке Якутии. Между тем, приводимые тенденции в настоящее время не являются характерными для климатических регионов [60].

Отдельного внимания заслуживает влияние на процесс эрозии почв многолетней мерзлоты, которая занимает свыше 60 % территории России, включая значительную площадь Сибирского и Дальневосточного ФО. За прошедший 30-летний период происходит интенсивная деградация мерзлоты в Сибири, ощутимый сдвиг границ к востоку, кроме прочего, таяние многолетней мерзлоты сопровождается выходом в атмосферу значительного количества метана [61].

Учитывая особенности модели разработанной НИЛЭПиРП можно сказать, что влияние талого стока на годовые потери почв от эрозии невелики (<10 %), поэтому в расчетах использовалась картографическая модель запасов воды в снеге, актуальная на середину 1980-х гг., так как ее актуализация существенно не повлияет на результат. Также мы исходим из того, что внутригодовое перераспределение жидких осадков осталось приблизительно неизменным.

Таблица 4

**Типы использования земель и значения факторов *C* и *P***

Тип использования земель	<i>C</i>	<i>P</i>
<b>ЛЕСА</b>		
Темнохвойные вечнозеленые	0,003	0,2
Светлохвойные вечнозеленые	0,003	0,2
Лиственные	0,003	0,2
Смешанные леса с преобладанием хвойных	0,003	0,2
Смешанные леса	0,003	0,2
Смешанные леса с преобладанием лиственных	0,003	0,2
Хвойные листопадные (лиственничные) леса	0,003	0,2
Редины хвойные листопадные (лиственничные)	0,003	0,2
<b>ТРАВЯНО-КУСТАРНИЧКОВАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ</b>		
Луга	0,02	0,25
Степи	0,01	0,2
Хвойные вечно-зеленые кустарники	0,01	0,2
Лиственные кустарники	0,01	0,2
<b>ТУНДРА</b>		
Кустарничковая	0,01	0,2
Травянистая	0,008	0,2
Кустарниковая	0,01	0,2
<b>ВОДНО-БОЛОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ</b>		
Болота	0,01	0,2
Прибрежная растительность	0,01	0,2
<b>ПРОЧАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ</b>		
Свежие гари	0,01	0,4
Пахотные земли	0,5	0,4
<b>НЕПОКРЫТЫЕ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ЗЕМЛИ</b>		
Вечные снега и льды	0,001	0,001
Открытые грунты и выходы горных пород	0,01	0,01
Реки и водоемы	0,001	0,001
<b>ПРОЧЕЕ</b>		
Урбанизированные территории	0,001	0,001
Отсутствие данных	0,001	0,001

**Карта типов земного покрова.** Типы земного покрова необходимо учитывать с позиции их влияния на смыв почвы. Типы растительного покрова позволяют скорректировать смыв почв в сторону уменьшения, а такие типы, как водные объекты, скалы, урбанизированные территории и пр., – дают основание вообще исключить их при расчетах.

Геобазы данных по типам земного покрова создавались на основе материалов Института космических исследований Земли ([www.iki-z.ru](http://www.iki-z.ru)). Форма представления: растровый слой. Пространственное разрешение 230 м. Система координат: равновеликая коническая проекция Альберса со сфероида WGS84. Основной источник первичной информации: данные спутниковых наблюдений прибором MODIS со спутника Тегга. Данные прошли предварительную обработку, направленную на устранение эффектов влияния облаков и других мешающих факторов. Распознавание типов земного покрова выполнено по их спектрально-отражательным характеристикам на основе контролируемой локально-адаптивной классификации спутниковых изображений, а также с использованием специально разработанных методов обработки спутниковых данных, анализирующих многолетние признаки распознавания (табл. 4) [62].

Значения факторов *C* и *P* задавались в виде таблиц безразмерных коэффициентов [63], на основе карт землепользования, с учетом их зависимости от типа растительности, стадии развития и площади покрова [64]. Значения факторов варьируют от 0 (защищенные почвы) до 1 (открытые почвы) [63] (табл. 4).

Результатами моделирования для исследуемого водосбора р. Лены стали карты эрозионной опасности земель. В наших расчетах используется фактор *C* (тип землепользования), так как фактор *P* подразумевает учет агрофона (границы фермерских хозяйств, пастбища и пр.), который в бассейне практически отсутствует. Подробности методики приводятся в работе Р. Panagos с соавторами [65].

## Результаты исследования и обсуждение

Сформированная геоинформационная база данных легла в основу расчета потенциальных потерь почвы в бассейне реки Лены по ранее приведенным формулам (1-3). Расчеты проведены в два этапа: сначала был определен потенциальный смыв почвы без учета реальной картины распределения растительного покрова, а затем – с его учетом.

Были забланкованы территории, где фактически либо вообще почвенный покров отсутствует (скальные участки, водно-болотные пространства, урбанизированные территории), либо почвы расположены в местоположениях, где эрозионные процессы не могут наблюдаться даже при условии сведения растительного покрова (поймы рек, болота и пр.) [65]. Для более точного определения такого рода территорий дополнительно проведено картографирование пойменных участков в соответствии с выбранным уровнем генерализации. Картографирование осуществлено с помощью визуального дешифрирования космических снимков высокого разрешения из открытых источников (Google Earth, SAS.Планета). Затем все эти участки были векторизованы и забланкованы [66].

Среднее значение потерь почвы без учета типов земного покрова по бассейну р. Лена составило 23,6 т/год, наибольшее 29099,7 т/год, что соответствует максимально возможному сценарию развития эрозии. При этом результаты моделирования показывают, что более 12 % территории находятся в зоне высокой эрозионной опасности ( $> 100$  т/га). С целью приведения результатов расчета смыва почв к реальной картине проведена дополнительная калибровка факторов модели с применением карты типов земного покрова (Landcover). Она учитывает через поправочный коэффициент зависимость смыва почв от типов растительности (рис.). Получена соответствующая электронная карта. Результаты этих расчетов показывают, что среднее значение годовых потерь почвы на территории исследования существенно уменьшилось и составляет 0,04 т/га. При этом на талый смыв приходится 0,01 т/га, на ливневой – 0,03 т/га. Доля земель с высоким коэффициентом эрозионной опасности ( $> 100$  т/га) снизилась до ничтожной величины и составила 0,0003 % от площади бассейна (табл. 6). Учитывая ландшафтно-географические особенности бассейна реки Лены, эти значения больше соответствуют реальности. Однако, нельзя отвергать и полученные материалы по смыву, отраженные на первой карте, составленной без учета растительного покрова. Она демонстрирует, что в случае интенсивного хозяйственного освоения территории данного бассейна, интенсивность эрозии почв может вырасти на порядок, то есть показывает максимально возможный сценарий развития эрозии.



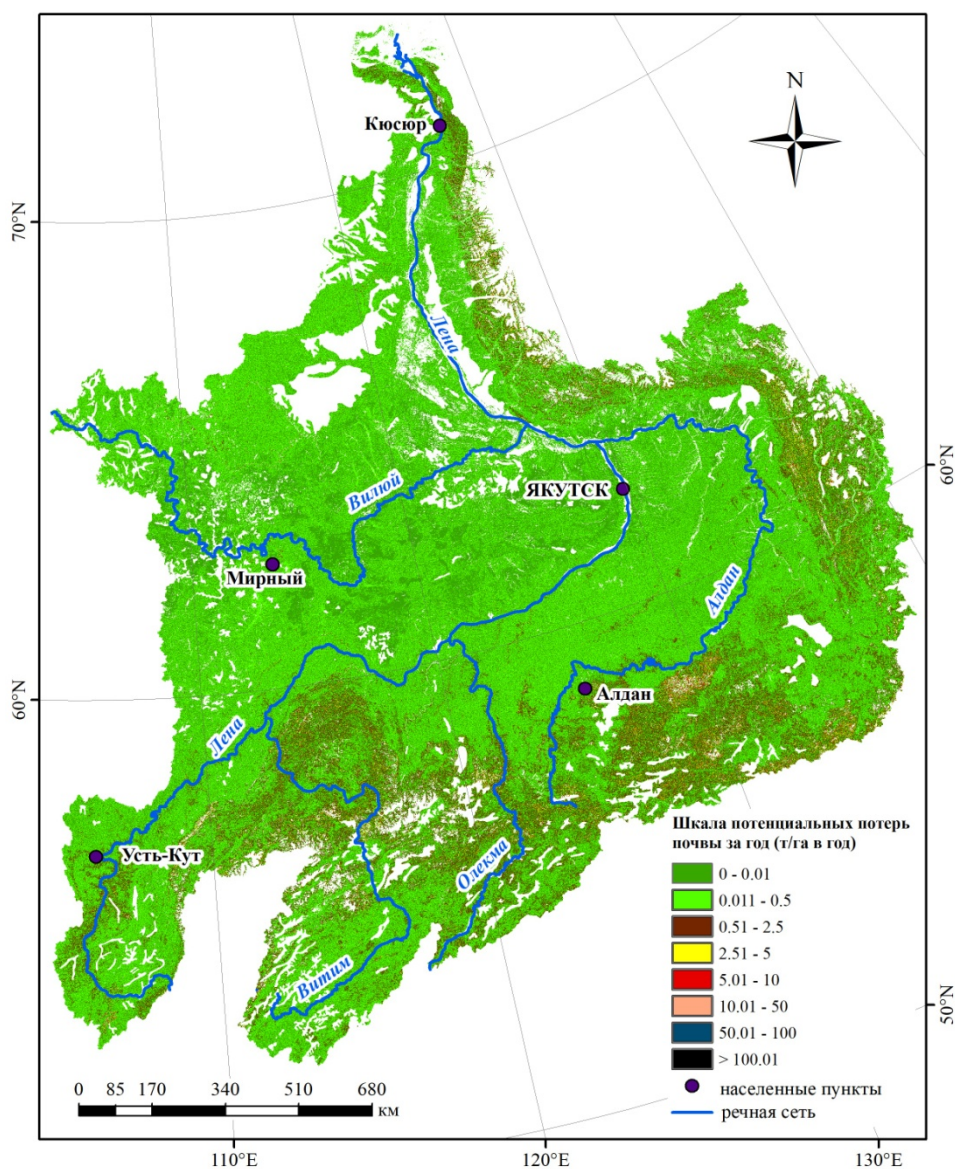


Рис. Карта потенциального смыва почв бассейна р. Лена

В литературе имеются сведения величины потенциального смыва почв на территорию Северной Европы. В целом среднее значение потенциального смыва почв в Западной Европе (ЕС-28) колеблется от 2,6 до 2,76 т/га/год [65; 67]. Для верификации полученных нами результатов можно использовать значения смыва почв в равнинной части северной Европы, где ландшафтные условия очень схожи с бассейном реки Лена. Проведенное сравнение данных показало сопоставимость полученных результатов. Так, для низменных равнинных территорий Северной Европы и бассейна р. Лена доминирует смыв в интервале 0–0,5 т/га/год. Некоторые отличия есть в максимумах: до 5 т/га/год – в Северной Европе, в бассейне р. Лена - 2,5 т/га/год. Анализ карт потенциального смыва почв для возвышенных равнин Северной Европы и бассейна р. Лена обнаруживают полную сходимость величин смыва: в среднем 2-5 т/га/год, с максимумом > 50 т/га/год.

На карте потенциального смыва почв бассейна р. Лена с учетом типов землепользования, представлены ареалы максимально возможного смыва, которые расположены по правому склону долины р. Лена. К ним относятся участки возвышенного рельефа (Лено-Ангарское плато, Становое нагорье, Патомское нагорье, Становой хребет, Алданское нагорье, Верхоянский хребет). Здесь встречаются ареалы с высокими показателями смыва почвы (> 50 т/га/год). В пределах левобережной части долины с низменным рельефом (Приленское плато, Центрально-якутская равнина, понижения Среднесибирского плоскогорья, Северо-Сибирская низменность) преобладает смыв до 0,5 т/га/год.

Таблица 6

**Распределение бассейна р. Лена по градам потенциального смыва почвы**

Смыв, т/га/год	Смыв почвы (без учета типов земного покрова)		Смыв почвы (с учетом типов земного покрова)	
	Площадь, км <sup>2</sup>	Доля от общей площади, %	Площадь, км <sup>2</sup>	Доля от общей площади, %
0-0,01	636 362,8	27,7	1 055 944,8	49,3
0,01-0,5	359 524,5	15,7	856 832,9	40,0
0,5-2,5	131 038,6	5,7	198 567,7	9,3
2,5-5	106 449,1	4,6	22 750,8	1,1
5-10	149 127,6	6,5	5 854,3	0,3
10-50	411 539,0	17,9	888,4	0 (0,04)
50-100	213 433,7	9,3	38,7	0 (0,002)
100-1000	283 628,3	12,4	6,4	0 (0,0003)
>1000	3 073,8	0,1		
Всего	2 294 177,3	100	2 140 884	100

В бассейне реки Алдан (в пределах Станового хребта, Алданского нагорья), вследствие общего возвышенного характера рельефа, и соответственно, больших значений эрозионного потенциала, смыв почв по правому склону доходит до 50 т/га/год. Далее по левому склону, где начинается Приленское плато, смыв почвы уменьшается, а максимальные значения не превышают 10 т/га/год. Ниже по течению Алдана, после впадения реки Ханда, преобладает низменный рельеф, что отражается на величинах смыва - в основном до 0,5 т/га/год. Совершенно иная морфометрия рельефа, соответствующая горным условиям, наблюдается в бассейнах притоков рек Витим и Олекма. Здесь, благодаря горному рельефу, смыв может достигать до 100 т/га/год, с фоновым значением 2,5–5 т/га/год. Бассейн р. Вилюй располагается в слабо расчлененном равнинном рельефе. В среднем течении он возвышенный, а в нижнем – низменный. Здесь значения смыва почв редко превышают 10 т/га/год, доминирует смыв не более 0,5 т/га/год.

**Выводы**

Для бассейна великой реки Сибири – Лены создана геоинформационная база данных, позволившая провести впервые для этого обширного региона России расчет потенциального смыва почвы. В состав геобазы данных включены количественные показатели параметров, влияющих на смыв почв, сгруппированных по тематическим блокам (морфометрия рельефа, морфолого-генетические свойства почв, климатические показатели). Расчеты потенциального смыва почвы бассейна р. Лена проведены с использованием модели, рекомендованной НИЛЭПиРП МГУ. Средняя величина потенциального смыва почв в бассейне без учета фактора типов земного покрова составила 23,6 т/га. Проведенные расчеты с учетом типов земного покрова, полученных по данным дистанционного зондирования из космоса, дали существенное, на порядок, уменьшение величин смыва почв (0,04 т/га). Благодаря высокой доле лесистости и низменному характеру территории левобережной части бассейна реки Лены доминируют ничтожные величины смыва почв. На эту категорию приходится около 50 %. Небольшой и умеренный смыв почв наблюдается на половине территории бассейна, а очень значительный – менее 0,05 %.

**Благодарности:** авторы выражают свою искреннюю признательность сотруднику НИЛ Эрозии почв и русловых процессов С.Ф. Краснову за предоставленную возможность использования технологии расчета смыва почв. Работа выполнена при финансовой поддержке Русского географического общества.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Lisetskii F.N., Buryak J.A., Zemlyakova A.V., Pichura V.I. Basin organizations of nature use, Belgorod region // Biogeosystem Technique. 2014. Vol. 2, N 2. PP. 163-173.
2. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // География и природные ресурсы 2017 № 2 С. 27–3. DOI: 10.1134/S1875372817020032.

3. Walling D.E., Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers // *Global and Planetary Change*. 2003. Vol. 39, N 1-2. PP. 111-126.
4. Syvitski J.P.M., Kettner A.J. Sediment flux and the Anthropocene // *Phil. Trans. of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sc.* 2011. Vol. 369. PP. 957-975. doi: 10.1098/rsta.2010.0329.
5. Barthes B., Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels // *Catena*. 2002. Vol. 47. PP. 133-149.
6. Uddin K., Murthy M.S.R., Shahriar M.W., Matin Mir A. Estimation of soil erosion dynamics in the Koshi basin using GIS and remote sensing to assess priority areas for conservation // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11(3): e0150494., pp. 1-19. doi:10.1371/journal.pone.0150494.
7. Alekseevskiy N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S. Erosion, sediment transportation and accumulation in rivers // *Int. J. of Sediment Research*. 2008. Vol. 23. PP. 93-105.
8. Маккаев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Географический фак-т МГУ, 2003. 355 с.
9. Ермолаев О.П., Мальцев К.А. Оценка эрозионного риска для почвенного покрова лесных и лесостепных ландшафтов Среднего Поволжья средствами ГИС-технологий // *Уч. записки Казанского гос. ун-та. Сер. Естественные науки*. 2008. Т. 150, кн. 4. С. 85-97.
10. Ивонин В.М., Тертерян А.В. Эрозия почвы во время ливней в производных лесах северо-западного Кавказа // *Лесной журнал*. 2015. № 1. С. 54-61.
11. Рыжов Ю.В. Эрозионно-аккумулятивные процессы в бассейнах малых рек юга Восточной Сибири // *География и природные ресурсы*. 2009. №3. С. 94-101.
12. Хаптухаева Н.Н. Оценка интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов в бассейне малых рек юга Восточной Сибири // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2012. № 1. С. 24-26.
13. Хаптухаева Н.Н., Тармаев В.А. Почвенно-эрозионные процессы в бассейнах малых рек Западного Забайкалья // *Вестн. СВНЦ ДВО РАН*. 2014. №3. С. 41-45.
14. Голубев И.А. Проблема определения интенсивности водной эрозии почв в Сибири // *Вестн. КрасГАУ. Сер. Землеустройство, кадастр и мониторинг*. 2009. №1. С. 80-83.
15. Кнауб Р.В. Географический анализ факторов поверхностного смыва и оценка современной эрозии на пахотных землях Томь-Яйского междуречья (в пределах Томской области): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2006. 11 с.
16. Grabs, W. E., F. Fortmann, and T. De Couuel, Discharge observation networks in Arctic regions: Computation of the river runoff into the Arctic Ocean, its seasonality and variability // *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*, 1998. Kluwer Acad., Norwell, Mass., 2000. P. 249-268.
17. Serreze, M.C., Bromwich D.H., Clark M.P., Etringer A.J., Zhang T., Lammers R.B. The large-scale hydroclimatology of the terrestrial Arctic drainage system // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, # D2, 8160. P. 1-28. doi:10.1029/2001JD000919.
18. Водные пути бассейна Лены / под общ. ред. Р.С. Чалова, В.М. Панченко, С.Я. Зернова. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
19. Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I., Shakhova N.E. Carbonate chemistry dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean: Pacific sector of the Arctic // *J. Marine Syst.* 2007. Vol. 66. P. 204-226.
20. Tananaev N.I. Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion, the Lena River, central Yakutia // *Geomorphology*. 2016. Vol. 253. P. 524-533.
21. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во КазГУ, 1984. 264 с.
22. Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. A reassessment of the Eurasian river input of water. Sediment, major elements, and nutrients to the Arctic ocean // *Amer. J. of Science*. 1996. Vol. 296. P. 664-691.
23. Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 212 с.
24. Магрицкий Д.М. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2010. № 6. С. 17-24.
25. Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
26. Заславский М.Н. Эрозиоведение. М.: Высш. шк. 1983. 320 с.
27. Alekseev M.N., Drouchits V.A. Quaternary fluvial sediments in the Russian Arctic and Subarctic: Late Cenozoic development of the Lena River system, northeastern Siberia // *Proceedings of the Geologists' Association*. 2004. Vol. 115. P. 339-346.
28. Yang D., Kane D.L., Hinzman L.D., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change // *Journal of geophysical research*. 2002. Vol. 107. P. 14-21.
29. Четверова А.А., Потапова Т.М., Федорова И.В. Геохимический сток арктических рек на примере рек Западной Сибири и реки Лены // *Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: Материалы IV Школы-конф. мол. ученых с междунар. уч. Петрозаводск*, 2011. С. 83-88.

30. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты на нижней Лене и Вилюе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. №6. С. 85-95.
31. Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // Hydrology and Earth System Sciences. 2015. Vol. 19. P. 2739.
32. Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, №1. С. 1-14.
33. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. М.: Изд-во МГУ, 1993. 200 с.
34. Методические указания по составлению крупномасштабных карт эрозионноопасных земель для обоснования почвозащитных мер при внутрихозяйственном землеустройстве / Г.А.Ларионов, С.Ф.Краснов, Л.Ф.Литвин и др. М.: Фонды Росземпроект. 1996. 47 с.
35. Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) // Open-File Report 2011-1073. Reston: U.S. Geological Survey, 2011. 26 p.
36. Danielson J.J., Gesch D.B. An enhanced global elevation model generalized from multiple higher resolution source datasets // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing. 2008. Vol. 37, Part B4. PP. 1857-863.
37. Мальцев К.А., Ермолаев О.П. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов // Геоморфология. 2014. № 1. С. 45-53.
38. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А. Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа // География и природ. ресурсы. 2014. № 3. С. 32-39.
39. Burrough, P.A., McDonell, R.A. Principles of Geogr. Information Systems. Oxford Univ. Press, 1998, 190 p.
40. Почвенная карта РСФСР (оцифрованный оригинал одноименной Почвенной карты) / Под ред. В.М. Фридланда. Масштаб 1:2 500 000. М.: ГУГК, 1988.
41. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2014. 768 с.
42. Рожков В.А., Алябина И.О., Колесникова В.М., Молчанов Э.Н., Столбовой В.С., Шоба С.А. Почвенно-географическая база данных России // Почвоведение. 2010. №1. С. 3-6.
43. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Интернет-ресурс официальной поддержки ЕГРПР. URL: <http://egrpr.esoil.ru/index.php>, свободный. (дата обращения: 18.05.2017).
44. Почвенные карты глобального охвата. GIS-lab. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. URL: <http://gis-lab.info/qa/world-soil-maps.html> (дата обращения: 18.05.2017).
45. Рухович Д.И., Вагнер В.Б., Вильчевская Е.В., Калинина Н.В., Королева П.В. Проблемы использования цифровых тематических карт на территорию СССР при создании ГИС "Почвы России" // Почвоведение. 2011. № 9. С. 1043-1055.
46. Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Симакова М.С., Долинина Е.А., Рухович С.В. Государственная почвенная карта – версия ArcInfo // Почвоведение. 2013. № 3. С. 251-267.
47. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
48. Рыбакова Н.А. Водопроницаемость мерзлых почв под насаждениями лесостепной зоны // Почвоведение. 1989. №8. С. 116-122.
49. Угаров И.С. Почвенно-гидрологические константы и водопроницаемость мерзлотных лугово-черноземных почв среднего течения р. Лены и Амги // Успехи совр. естествознания. 2015. №1. С. 26-28.
50. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой Центр Данных. Федеральный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <http://meteo.ru>. Дата обращения 13.06.2017.
51. Расписание погоды. URL: <https://tr5.ru/>, свободный. Дата обращения 13.06.2017.
52. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой Центр Данных. Федеральный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Координаты метеостанций. URL: <http://meteo.ru/data/155-meteostations>. Дата обращения 18.05.2017
53. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации - Мировой Центр Данных. Федеральный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные). URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#> описание-массива-данных. (дата обращения: 18.05.2017).
54. Кокорев В.А., Шерстюков А.Б. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России // Арктика. XXI век. Естественные науки. 2015. №2. С. 5-23.
55. Семенов В.А. География климатообусловленных изменений опасных наводнений на реках России в конце XX-начале XXI столетий // Тр. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2014. Вып. 177. С. 160-174.
56. Канатьева Н.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Современные изменения климатических факторов эрозии в Северном Приволжье // Эрозия почв и русловые процессы. 2010. Вып. 17. С. 14-28.

57. Арманд Д.Л. Физико-географические основы проектирования сети полевых защитных лесных полос. М.: Ин-т географии АН СССР, 1961. 367 с.
58. Киркби М.Д. Эрозия и окружающая среда. М.: Колос, 1984.
59. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М., 2017. 70 с.
60. Бульгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н. Снежный покров на территории России и его пространственные и временные изменения за период 1966-2010 гг. // Пробл. эколог. мониторинга и моделирования экосистем. 2011. Т. 24. С. 211-227.
61. Макаров И.А. Влияние изменения климата на регионы. // Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2014 год / под ред. Л.М. Григорьева и С.Н. Бобылева. М.: Аналит. центр при Правительстве РФ, 2014. С. 185-203.
62. Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. Оценка площади пожаров на основе комплексов спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Совр. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 9-27.
63. Renard K. et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) // Agric. Handb. 1997. N 703. 404 p.
64. Gitas I.Z., Douros K., Minakou Ch., Silleos G.N., Karydas G.N. Multi-Temporal Soil Erosion Risk Assessment in N. Chalkidiki Using a Modified USLE Raster Model // EARSeL eProceedings 8. 2009. Vol. 1. PP. 40-52.
65. Panagos P. et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe // Environ. Sci. Policy. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 54, August. PP. 438-447.
66. Шынбергенев Е.А. Идентификация пойм крупных рек Сибири (Обь, Енисей, Лена) по данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) из космоса // Трешниковские чтения – 2017: Совр. геогр. картина мира и технол. географического образования / под ред. Н.А. Ильиной и др. 2017. С. 304-305.
67. Bosco C. et al. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. Vol. 15, № 2. PP. 225-245.

Поступила в редакцию 28.08.17

*Ye.A. Shynbergenov, O.P. Yermolaev*

#### THE POTENTIAL SOIL EROSION OF THE LENA RIVER BASIN

The article presents the assessment technique of potential soil loss in the pool of one of the Great Rivers of Russia – the Lena River – with the use of GIS. The chosen level of generalization corresponds to regional one (1:1 000 000). For the first time for a so big territory located in the east of Siberia, the geodatabase on the basis of basin approach for soil erosion calculation has been created. To calculate the size of loss, a global DEM "GMTED2010" was taken as a relief model, as well as hydrological layer network corresponding to scale 1:1 000 000. Formation of the geodatabase is considered in detail; it is constructed by the multiplicative structure principle where the key parameters of a relief (length, steepness, exposition, erosive potential of a relief), soils, climatic characteristics and modern types of a terrestrial cover are reflected. At a quantitative level with rather high extent of spatial specification the results of calculation of potential soil loss are received. The average potential soil loss rate in the pool without a factor of types of a terrestrial cover was 23,6 t/ha. The carried-out calculations taking into account the types of a terrestrial cover received according to remote sensing from space, gave an essential (by an order of magnitude) reduction of soil loss rate (0,04 t/ha). Through a high share of woodiness and low-lying territory of a left-bank part of the Lena river basin insignificant soil loss rate dominates. This category is about 50 %. Small and moderate soil loss is observed on a half of the basin territory, and very considerable – less than 0,05 %.

*Keywords:* Lena River, morphometric analysis of relief, soils of Siberia, types of land use, potential soil erosion.

#### REFERENCE

1. Lisetskii F.N., Buryak J.A., Zemlyakova A.V., Pichura V.I. Basin organizations of nature use, Belgorod region, in *Biogeosystem Technique*, 2014, vol. (2), no. 2, pp. 163-173.
2. Ermolaev O.P., Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., and Vedeneeva E.A. Cartographic Model of River Basins of European Russia // *Geography and Natural Resources*, 2017, Vol. 38, No. 2, pp. 131-138. DOI: 10.1134/S1875372817020032.
3. Walling D.E., Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers, in *Global and Planetary Change*, 2003, vol. 39, no. 1-2, pp. 111-126.
4. Syvitski J.P.M., Kettner A.J. Sediment flux and the Anthropocene // *Phil. Trans. of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sc.* 2011, vol. 369, pp. 957-975. doi: 10.1098/rsta.2010.0329.
5. Barthes B., Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels // *Catena*, vol. 47, 2002, pp. 133-149.

6. Uddin K., Murthy M.S.R., Shahriar M.W., Matin Mir A. Estimation of soil erosion dynamics in the Koshi basin using GIS and remote sensing to assess priority areas for conservation // *PLoS ONE*, vol. 11(3): e0150494. 2016, pp. 1-19. doi:10.1371/journal.pone.0150494
7. Alekseevskiy N.I., Berkovich K.M., Chalov R.S. Erosion, sediment transportation and accumulation in rivers // *Int. J. of Sediment Research*, vol. 23, 2008, pp. 93-105.
8. Makkaveev N.I. *Ruslo reki i erosiya v ee bassejne* [River channel and erosion in its basin], M., 2003, 355 p (in Russ).
9. Yermolaev O.P., Malcev K.A. [Erosion's risk assessment for a soil coverage of forest and forest-steppe landscapes of Middle Volga by means of GIS-technologies] in *Uch. zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta, Estestvennyye nauki*, vol. 150, no. 41, 2008, pp. 85-97 (in Russ).
10. Ivonin V.M., Terteryan A.V. [Soil Erosion During Rainstorms in the Second Growth of the Northwest Caucasus] in *Lesnoy jurnal*, no. 1, 2015. pp. 54-61 (in Russ).
11. Ryzhov Yu.V., Рыжов Ю.В. [Erosion-accumulative processes in the basins of small rivers in the south of Eastern Siberia] in *Geographiya i prirodnye resursy*, no. 3, 2009. pp. 94-101 (in Russ.).
12. Haptuhaeva N.N. [Assessment of the intensity of erosion-accumulation processes in the basin of small rivers in the south of Eastern Siberia] in *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2012. no. 1. pp. 24-26 (in Russ).
13. Haptuhaeva N.N., Tarmaev V.A. [Soil-erosion processes in the basins of small rivers of Western Transbaikalia] in *Vest. SVNC DVO RAN*, 2014, no. 3, pp. 41-45 (in Russ.).
14. Golubev I.A. [The issue of the Siberian water soil erosion intensity determination] in *Vest. KrasGAU, zemleustroystvo, kadastr i monitoring*. 2009. no. 1. pp. 80-83 (in Russ.).
15. Knaub R.V. [Geographical analysis of surface flushing factors and assessment of modern erosion on arable lands of Tom-Yai interfluvium (within the Tomsk region)]. Abstract of Diss. cand. geo. Sc. Tomsk, 2006. 11 p.
16. Grabs, W. E., F. Fortmann, and T. De Couel, Discharge observation networks in Arctic regions: Computation of the river runoff into the Arctic Ocean, its seasonality and variability, in *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Tallin, 1998*, pp. 249 – 268, Kluwer Acad., Norwell, Mass., 2000.
17. Serreze, M.C., Bromwich D.H., Clark M.P., Etringer A.J., Zhang T., Lammers R.B. The large-scale hydroclimatology of the terrestrial Arctic drainage system // *J. Geophys. Res.*, vol. 108, # D2, 8160, 2003, pp. 1-28. doi:10.1029/2001JD000919.
18. *Vodnye puti basseyna Leny* [Waterways of the basin of Lena], Chalov R.S., Panchenko V.M., Zernov S.Ya. (ed), *MIKIS*, 1995. 600 p (in Russ.).
19. Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I., Shakhova N.E. Carbonate chemistry dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean: Pacific sector of the Arctic // *J. Marine Syst.*, vol. 66, 2007, pp. 204–226.
20. Tananaev N.I. Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion, the Lena River, central Yakutia // *Geomorphology*, vol. 253, 2016, pp. 524-533.
21. Dedkov A.P., Mozzerin V.I. *Erozija i stok nanosov na Zemle* [Erosion and sediment yield of Earth], Kazan: *Izd-vo KazGU*, 1984. 264 p (in Russ.).
22. Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. A reassessment of the Eurasian river input of water. Sediment, major elements, and nutrients to the Arctic ocean // *Amer. J. of Science*. 1996, vol. 296, pp. 664–691.
23. Chalov R.S., Liu Shuguan, Alekseevskiy N.I. *Stok nanosov i ruslovyje protsessy na bol'shijh rekah Rossii i Kitaya* [Sediment yield and channel processes on large rivers of Russia and China], M.: *Izd-vo Mosk. un.*, 2000. 212 p (in Russ).
24. Magritskiy D.M. [Annual run-off of suspended sediment yields of Russian rivers in the catchment area of the Arctic Ocean and its anthropogenic changes] in *Vest. Mosk. un. Ser. Geographiya*, no.6, 2010. p.17-24 (in Russ.)
25. Lisetskii F.N., Svetlichnyi A.A., Chornyy S.G. *Sovremennyye problemy erozijovedenia* [Recent developments in erosion science]. Svetlichnyi A.A. (ed), Belgorod: Konstanta, 2012. 456 p (in Russ.).
26. Zaslavsky M.N. *Erozijovedenie* [Erosion], M.: Vysh. shkola, 1983, 320 p. (in Russ.).
27. Alekseev M.N., Drouchits V.A. Quaternary fluvial sediments in the Russian Arctic and Subarctic: Late Cenozoic development of the Lena River system, northeastern Siberia, in *Proceedings of the Geologists' Association*, 2004, vol. 115, pp. 339-346.
28. Yang D., Kane D.L., Hinzman L.D., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change // *Journal of geophysical research*, vol. 107, no. D23, 4694, 2002, pp. 14-2.
29. Chetverova A.A., Potapova T.M., Fedorova I.V. [Geochemical runoff of Arctic rivers on the example of the rivers of Western Siberia and the Lena River] in *Vodnaya sreda i prirodno-territorial'nye komplekсы: issledovanie, ispol'zovanie, ohrana*, 2011. pp. 83-88 (in Russ.).
30. Magritskiy D.V. [Factors and patterns of long-term changes in water flow, suspended sediments and heat on the lower Lena and Viluy] in *Vest. Mosk. universiteta. Ser. 5. Geographiya*. 2015. no. 6. pp. 85-95 (in Russ.).
31. Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2015, 2739 p.

32. Magritskiy D.V. [Anthropogenic impacts on the runoff of rivers flowing into the seas of the Russian Arctic] in *Vodnye resursy*, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 1-14 (in Russ.).
33. Larionov G.A. *Erozija i defljacija pochv: osnovnye zakonovernosti i kolichestvennye ocenki* [Erosion and deflation of soils: basic patterns and quantitative estimates], M.: *Izd-vo MGU*, 1993. 200 p (in Russ.).
34. Larionov G.A., Krasnov S.F., Litvin L.F., et al. *Metodicheskie ukazanija po sostavleniju krupnomasshtabnyh kart jerozionnoопасnyh zemel' dlja obosnovanija pochvozashhitnyh mer pri vnutrihozjajstvennom zemleustrojstve* [Methodological guidelines for the compilation of large-scale maps of erosion-hazardous lands for the justification of soil protection measures for on-farm land management] M. *Fondy Roszemproect*. 1996. 47 p (in Russ.).
35. Danielson J. J., Gesch D. B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010) // Open-File Report 2011–1073. – Reston: U.S. Geological Survey, 2011, 26 p.
36. Danielson J. J., Gesch D. B. An enhanced global elevation model generalized from multiple higher resolution source datasets // International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing. 2008, vol. XXXVII, Part B4. pp. 1857–1863.
37. Mal'tsev K.A., Yermolayev O.P. [Using DEMs for automatic plotting of catchments] in *Geomorphology*, 2014, no. 1, p. 45–53 (in Russ.).
38. Yermolayev O.P., Mal'tsev K.A., Ivanov M.A. [Automated Construction of the Boundaries of Basin Geosystems for the Volga Federal District] in *Geography and Natural Resources*, 2014, vol. 35, no. 3, pp. 222–228 (in Russ.).
39. Burrough, P.A., McDonell, R.A. Principles of Geogr. Information Systems. Oxford Univ. Press, 1998, 190 p.
40. *Pochvennaya karta RSFSR* [Soil map of RSFSR] (Digitized original of the same name Soil map) / Fridland V.M. (ed). Scale 1:2 500 000. M.: *GUGK*, 1988 (in Russ.).
41. *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii* [The Unified State Register of Soil Resources of Russia], V. 1.0. Collective monograph. M.: Soil institute of V.V. Dokuchaev, 2014. 768 p (in Russ.).
42. Rozhkov V.A., Aliabina I.O., Kolesnikova V.M., Molchanov E.N., Stolbovoy V.S., Shoba S.A. [Soil and geographic database of Russia], in *Pochvovedenie*, 2010, no. 1, pp. 3-6 (in Russ.).
43. *Edinyj gosudarstvennyj reestr pochvennyh resursov Rossii* [The Unified State Register of Soil Resources of Russia] in Internet-resource of official support of the USSR [Electronic resource]. <http://egrpr.esoil.ru/index.php>. Verified 18.06.2017 (in Russ.).
44. Soil maps of global coverage. GIS-lab - Geographic information systems and remote sensing [Electronic resource]. - <http://gis-lab.info/qa/world-soil-maps.html>. Verified 18.06.2017 (in Russ.).
45. Ruhovich D.I., Vagner V.B., Vil'chevskaya E.V., Kalinina N.V., Koroleva P.V. [The problems of using digital thematic maps on the territory of the USSR when creating the GIS «Soil of Russia»], in *Pochvovedenie*, 2011, no. 9, pp. 1043–1055 (in Russ.).
46. Ruhovich D.I., Koroleva P.V., Kalinina N.V., Vil'chevskaya E.V., Simakova M.S., Dolinina E.A., Ruhovich S.V. [State soil map - Version ArcInfo], in *Pochvovedenie*, 2013, no. 3, pp. 251–267 (in Russ.).
47. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsia i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostic of soils of the Russia], G.V. Dobrovolskiy (ed), 2004, 342 p (in Russ.).
48. Rybakova N.A. [Water permeability of frozen soils under plantations of forest-steppe zone], in *Pochvovedenie*, 1989, no. 8, pp. 116-122 (in Russ.).
49. Ugarov I.S. [Soil-hydrological constants and water permeability of cryogenic meadow-chernozem soils of the middle reaches of Lena and Amga rivers], in *Uspehi sovr. estestvoznania*, 2015, no. 1, pp. 26-28 (in Russ.).
50. All-Russian Scientific Research Institute of HydroMeteorological Information - World Data Center. Federal Center for Hydromet. & Envir. Monit. [Electro resource]. <http://meteo.ru>. Verified 13.06.2017 (in Russ.).
51. The weather schedule [Electronic resource]. <https://rp5.ru/>, free. - Issue 13.06.2017 (in Russ.).
52. All-Russian Scientific Research Institute of HydroMeteorological Information - World Data Center (RIHMI-WDC). Federal Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Coordinates of meteorological station [Electronic resource]. <http://meteo.ru/data/155-meteostations>. Verified 18.06.2017 (in Russ.).
53. All-Russian Scientific Research Institute of HydroMeteorological Information - World Data Center. Federal Center for Hydromet. and Envir. Monit. Air temperature and precipitation (daily data) [Electro resource] <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива>. Verified 18.05.2017 (in Russ.).
54. Kokorev V.A., Sherstyukov A.B. [About meteorological data for studying modern and future climate changes in Russia], in *Arctic. XXI vek. Estestvennye nauki*, 2015, no. 2, pp. 5-23 (in Russ.).
55. Semenov V.A. [Geography of climate-induced changes in dangerous floods on the rivers of Russia in the late XX-early XXI centuries], in *Trudy FGBU «RIHMI-WDC»*, 2014, iss. 177, pp. 160-174 (in Russ.).
56. Kanatieva N.P., Krasnov S.F., Litvin L.F. [Modern changes in climatic factors of erosion in the Northern Volga region], in *Erosiya pochv i ruslovyje processy*, 2010, iss. 17, pp. 14-28 (in Russ.).
57. Armand D.L. *Fiziko-geograf. osnovy proektirovaniya seti polezashitnyh lesnyh polos* [Physical and geograph. basis for proecting a network of forest shelterbelts], M: Geo. Inst. of SA USSR, 1961, 367 p (in Russ.).
58. Kirkbi M.D. *Erosija i okružhayushaya sreda* [Erosion and environment]. Moscow: Kolos, 1984 (in Russ.).
59. *Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoy Federatsii za 2016 god* [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2016], M., 2017, 70 p. (in Russ.).

60. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н. [Snow cover in the territory of Russia and its spatial and temporal changes for the period 1966-2010], in *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ecosystem*, vol. 24, М., 2011, pp. 211-227 (in Russ.).
61. Makarov I.A. [The impact of climate change on the regions], in *Doklad o chelovecheskom razviti v RF za 2014 g*, L.M. Grigoriev, S.N. Bobylev (ed), М.: Analitic. centr pri Pravitel'stve RF, 2014, pp. 185-203 (in Russ.).
62. Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupian E.A., Stitsenko F.V., Flitman E.V. [Integrated burnt area assessment based on combine use of multi-resolution MODIS and Landsat-TM/ETM+ satellite data], in *Sovremennye problemy distantsionn zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 9-27 (in Russ.).
63. Renard K. et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), in *Agric. Handb.*, 1997, no. 703, 404 p.
64. Gitas I.Z., Douros K., Minakou Ch., Silleos G.N., Karydas G.N. Multi-Temporal Soil Erosion Risk Assessment in N. Chalkidiki Using a Modified USLE Raster Model, in *EARSeL eProceedings 8*, 2009, vol. 1, pp. 40-52.
65. Panagos P. et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, in *Environ. Sci. Policy*, Elsevier Ltd, Vol. 54, № August, 2015, pp. 438-447.
66. Shynbergenov Y.A. [Identification of the floodplains of the major rivers of Siberia (Ob, Yenisei, Lena) from the data of remote sensing of the Earth (RS) from space], in *Treshnikovskie chtenia-2017 [Treshnikov readings]: Modern geogr. picture of the world & technol. of geogr educ*, N.A. Il'ina et al (ed), 2017, pp. 304-305 (in Russ.).
67. Bosco C. et al. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility, in *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 225-245.

Шынбергенов Ерлан Алимжанович, аспирант  
кафедры ландшафтной экологии  
E-mail: shynbergenov.erlan@mail.ru

Ермолаев Олег Петрович,  
доктор географических наук, профессор кафедры  
ландшафтной экологии  
E-mail: oyermol@gmail.com

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)  
федеральный университет»  
420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Shynbergenov Ye.A., postgraduate student  
at Department of the Landscape Ecology  
E-mail: shynbergenov.erlan@mail.ru

Yermolaev O.P.,  
Doctor of Geography, Professor at Department  
of the Landscape Ecology  
E-mail: oyermol@gmail.com

Kazan Federal University  
Kremlyovskaya st., 18, Kazan, Russia, 420008