

с поселками. Расстояния между скважинами – 100...200 м.

Координаты скважин закрепляют на лесопожарной карте. Огонь подземного фронта пожара подходит к скважине и через отверстия перфорации трубы поджигает дымообразующий пиростов. Пиростов загорается, и над скважиной появляется устойчивый столб дыма, который фиксирует наблюдатель. Граница подземного пожара совпадает с координатой скважины, над которой появился столб дыма.

Предложенная конструкция сигнальных скважин была испытана в грунтовом лотке. Лоток глубиной 0,5 м был заряжен слоем торфа мощностью 0,4 м, сверху торф прикрывался слоем песка. В лотке были установлены пять модельных скважин, заполненных

пиростовом. Основание слоя торфа поджигали. При подходе фронта огня каждая сигнальная скважина выделяла устойчивый столб дыма.

Таким образом, применение сигнальных скважин при контроле подземного пожара существенно повышает точность определения положения его границ.

1. **Щегинский Е. А.** Охрана лесов. – Пушкино : ВНИИЛМ, 2001. – 316 с.

2. Способ установления местоположения лесного пожара : пат. 2294782 Рос. Федерация. МПК<sup>7</sup> А 62 С 4/00 ; опубл. 10.03.07. – Бюл. № 7. – 3 с.

Материал поступил в редакцию 29.04.09.

**Касьянов Александр Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Почвоведение и земледелие», заслуженный изобретатель РФ

Тел. 8 (495) 976-30-70

УДК 502/504: 519.8:551.2./3.

**О. Е. КИСЕЛЕВА, Н. В. КОЛОМИЙЦЕВ**

Государственное научное учреждение

«Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова»

## **ПРОТИВОЭРОЗИОННОЕ ОБУСТРОЙСТВО СКЛОНОВЫХ ЗЕМЕЛЬ В БАСЕЙНАХ МАЛЫХ РЕК НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

*Защита почв от эрозии – важнейшая составляющая комплексного обустройства территории. На примере типичного малого водосборного бассейна реки Любожихи (правый приток реки Оки в среднем течении, Московская область) рассмотрено построение системы принятия решений по назначению комплекса противоэрозионных агромероприятий. В основе системы лежит взаимодействие комплексной модели эрозии почв и ГИС-бассейна малой реки. Назначение противоэрозионных мероприятий производится на основе прогноза возможных потерь почвы с водосбора при заданных условиях снеготаяния и различных сценариях использования земель в бассейне.*

*Эрозия, комплексное обустройство территории, противоэрозионные агромероприятия, экосистема водосборного бассейна, ГИС-технологии.*

*The erosion soil protection is a very important part of the territory complex development. On the example of the typical small catchment basin of the Lyubozhikha river (the right tributary of the Oka river in the mean current, the Moscow region) there is considered a construction of the system of taking decisions on assignment of a complex of soil protection and conservation measures. The system is based on the interaction between a complex model of soil erosion and GIS of a small river basin. The assignment of anti-erosion measures is performed on the basis of forecasting possible soil losses from water catchment under the given conditions of snowmelt and different scenarios of land usage in the basin.*

*Erosion, complex development of the territory, soil protection and conservation measures, ecosystem of water catchment basin, GIS technologies.*

Эффективность бассейнового принципа для изучения и охраны природной среды подтверждается исследованиями многочисленных авторов как в нашей стране, так и за рубежом. Эко-система водосборного бассейна отличается от других территориальных единиц несколькими преимуществами: четкостью и однозначностью пространственных границ; однонаправленностью потока вещества к базису эрозии; аналогичным строением водосборных бассейнов всех уровней [1].

Бассейны малых рек имеют наибольшее распространение и интенсивно используются в сельскохозяйственном производстве. В то же время они наиболее уязвимы к антропогенным воздействиям, направленным на изменение растительного покрова на водосборе.

Эрозия почв является одним из наиболее распространенных причин деградации ландшафтов в Российской Федерации. В Российской Федерации из общей площади сельскохозяйственных угодий в 220 млн га более 40 % потенциально подвержены водной эрозии и 18 % составляют земли разной степени эродированности. Среди них 69 % – пашни, 31 % – сенокосы и пастбища, 95 % эродированной пашни расположено на склоновых землях с уклоном более 2° в бассейнах малых рек [2]. Для условий Средне-Русской возвышенности до 80 % годовых потерь почвы приходится на период весеннего снеготаяния [3].

Защита почв от эрозии – важнейшая составляющая комплексного обустройства территорий. Применение научно обоснованного комплекса противоэрозионных мероприятий позволяет предотвратить развитие эрозионных процессов.

Многочисленными исследованиями доказано, что один из наиболее эффективных подходов к выбору оптимальных параметров противоэрозионных мероприятий при обустройстве эрозионно-опасных земель основан на использовании математических моделей эрозии почв. На современном этапе исследований эффективность математического

моделирования существенно повышается при использовании геоинформационных технологий с учетом численного отображения морфометрических характеристик склонов, свойств почвенного покрова, распределения снеготаяния и др.

Модели эрозии почв подразделяются на физические и эмпирические. К эмпирическим относятся модели талого смыва Г. И. Швобса, И. К. Срибного, Г. П. Сурмача, Е. А. Гаршинева, В. Д. Иванова, В. П. Герасименко, ГГИ, RUSLE, MUSLE, EPIC, ECOSYS, CREAMS, dABAG; к физическим – модели Ц. Е. Мирцхулавы, М. С. Кузнецова, WEPP, EUROSEM, OPUS, SWAM.

Эмпирические модели дают точные результаты интенсивности смыва и не требуют постановки многочисленных натурных опытов для определения входных параметров. В то же время существующие эмпирические модели не позволяют производить прогнозирование процесса эрозии и недостаточно учитывают особенности процесса смыва почв на склоновых землях.

Эмпирической моделью талого смыва почв при снеготаянии, пригодной для обоснования противоэрозионных мероприятий, является модель ГГИ в модификации Г. А. Ларионова [4]. Она основана на большой эмпирической базе для условий России и позволяет оценить потери почвы на склоновых землях. Однако в данной модели учитывается общий слой склонового стока, что снижает точность расчетов. Многими авторами отмечено, что смыв почвы осуществляется только водой, стекающей после появления проталин в определенных условиях температурного режима и влажности почвы [5–7].

В таких условиях для прогнозирования поверхностного склонового стока, вызывающего смыв почв, целесообразно использовать систему моделей, включающую модель формирования снежного покрова и снеготаяния [8] и модель аккумуляции талых вод [9]. Модель снеготаяния включает расчет накопления снега на основе учета граничных

температур, проседания снега по методу Ф. Бергле [10] и расчета интенсивности снеготаяния на основе коэффициентов стаивания. Коэффициент стаивания – это слой талой воды в миллиметрах, приходящийся на один градус средней суточной температуры воздуха, вычисляется эмпирическим путем [11]:

$$I_{\text{водоот.пот}} = k_c \sum t_2, \quad (1)$$

где  $I_{\text{водоот.пот}}$  – потенциальная интенсивность снеготаяния, мм;  $\sum t_2$  – сумма положительных среднесуточных значений температуры воздуха на высоте 2 м;  $k_c$  – коэффициент стаивания, мм/°С.

Использование данного метода обусловлено тем, что, как правило, для малоизученных бассейнов имеется лишь показатель среднесуточного значения температуры воздуха – единственный носитель информации для важнейших теплообменных процессов. Коэффициент стаивания непостоянен в течение года, он зависит от географического положения бассейна и степени покрытия растительностью.

Для перехода от потенциальной к реальной интенсивности снеготаяния необходимо оценить водный эквивалент снега и выпавших осадков.

Образовавшаяся в снеге вода и жидкие осадки ведут к проседанию снега, высота снежного покрова после проседания рассчитывается на основе уравнения Ф. Бергле [10]:

$$H^* = H_{\text{нач}}^{**} + \frac{h_{\text{ос.тв}}}{PD_{\text{нач}}} - \frac{\left( H_{\text{нач}}^{**} + \frac{h_{\text{ос.тв}}}{PD_{\text{нач}}} \right)}{W_{\text{тв}} + h_{\text{ос.тв}}}, \quad (2)$$

где  $H^*$  – высота снежного в данный момент времени, мм;  $H_{\text{нач}}^{**}$  – высота снежного покрова после осаднения за предшествующий расчетный отрезок времени, мм;  $h_{\text{ос.тв}}$  – осадки в виде снега, мм;  $W_{\text{тв}}$  – водный эквивалент «сухой» части снега, мм;  $PD_{\text{нач}}$  – плотность наслоения снежного покрова, г/см<sup>3</sup> (для свежеснежавшего снега – 0,1 г/см<sup>3</sup>, критическое значение – 0,4 г/см<sup>3</sup> [1]).

Общая водоотдача снежного покрова вычисляется по методу Д. Кнауфа [12]:

$$I_{\text{водоот.общ}} = [1 - \exp(-(PD/PD_{\text{крит}})^4)] \times (I_{\text{водоот}} - h_{\text{ос.ж}}), \quad (3)$$

где  $I_{\text{водоот}}$  – реальная интенсивность снеготаяния;  $h_{\text{ос.ж}}$  – осадки в виде дождя, мм.

Поступающая на поверхность почвы талая вода во время весеннего снеготаяния не полностью стекает в овражно-балочную и русловую сеть. Часть ее распределяется между испарением с поверхности снега и почвы, задерживается в неровностях микро рельефа и впитывается в почву.

Анализ исследований [9, 13] показал, что формирование склонового стока происходит в условиях с образованием и без образования запирающего слоя. В качестве основной характеристики мерзлой почвы в данной работе принят комплексный показатель образования запирающего слоя, предложенный С.В. Ясинским, Е.М. Гусевым [9]:

$$B = \xi W_{20}, \quad (4)$$

где  $\xi$  – глубина промерзания почвы, см;  $W_{20}$  – влажность верхних 20 см, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>.

Критерием образования запирающего слоя служит следующее условие:

$$B > B^* > 25, \quad (5)$$

где  $B^*$  – критическое значение, при превышении которого происходит образование запирающего слоя.

При наличии запирающего слоя максимум смыва почвы приходится на главную фазу снеготаяния со среднесуточной температурой воздуха + 3...5 °С, когда поверхность почвы оголяется на 50...75 % [14]. Верхний слой почвы оттаивает, находится в переувлажненном состоянии и легко смывается потоками талой воды по мерзлому слою почвы. При отсутствии запирающего слоя объем впитавшейся в почву воды (за счет водоотдачи из снежного покрова и выпавших осадков) за сутки:

$$I_{\text{впит}} = 0,5 K_m \Delta t, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – расчетный период, 24 ч; 0,5 – коэффициент зависимости водоотдачи от времени суток;  $K_m$  – коэффициент фильтрации мерзлой почвы с учетом ее льдистости.

Слой склонового стока для расчетного участка склона, мм,

$$h_{\text{пов ст}} = (I_{\text{водоот.общ}} - I_{\text{впит}}) \Delta t. \quad (7)$$

Использование полученного слоя поверхностного стока в модели эрозии почв Г. А. Ларионова позволяет уточнить расчет интенсивности эрозионных процессов. Расчетные уравнения модели

талого смыва и примеры расчета приводятся в монографии [4].

Расчет смыва почвы по элементам склона производится так:

$$W_k = W_{lk} - W_{l(k-1)},$$

где  $W_{lk}$  – модуль смыва на склоне от его вершины до конца  $k$ -го отрезка, т/га;  $W_{l(k-1)}$  – модуль смыва на склоне от его вершины до конца  $k-1$ -го отрезка, т/га.

Взаимная увязка моделей и их программирование в единой программной среде MatLAB 2007b позволила разработать комплексную модель прогноза потерь почвы со склонов при весеннем снеготаянии [15].

Привязка комплексной модели к территории осуществляется на основе ГИС водосборного бассейна. В результате взаимодействия матрицы, описывающей территорию, базы данных и комплексной модели возможен прогноз потерь почв со склона, а также проведение сценарных исследований использования склоновых земель.

Назначение противоэрозионных мероприятий выполняется последовательно для всех элементов склона. После назначения севооборота, агротехнической обработки почв и агромелиоративных мероприятий проводят расчет изменения водопроницаемости почв, потерь почвы и сравнивают полученные значения с допустимыми значениями, если агротехническими мерами не удастся снизить смыв до нормативного уровня на всем склоне. Определяется расстояние от водораздела до точки, где условие перестает выполняться. Здесь размещается водозадерживающее или водоотводящее гидротехническое сооружение. Допустимые значения принимаются с учетом типа почвы и степени ее эродированности, по Ю. П. Сухановскому [16].

Для апробации разработанной ГИС-поддержки принятия решений был выбран водосбор реки Любожихи (правый приток Оки). Водосборная площадь реки до створа наблюдений равна 18,8 км<sup>2</sup>, из которых пашней занято 1015 га (53,9 %), лесные массивы составляют 655 га (34,8 %), луговые – 176 га (9,3 %) и селитебные террито-

рии занимают 25 га (1,4 %). Почвенный покров представлен серыми лесными почвами на покровных суглинках. Данный бассейн является типичным для центра Русской равнины по геологическому строению, литологическому составу почвообразующих пород, уровню сельскохозяйственного освоения.

На территории водосборного бассейна располагается опытно-полевая станция Института фундаментальных проблем биологии РАН, на которой проводятся систематические наблюдения за изменением характеристик почвенного покрова, интенсивностью эрозии почв. На территории города Пуцино располагается метеостанция для наблюдений за температурой воздуха, осадками, температурой почвы. Наблюдения ведутся с 2004 года, дискретность измерений составляет 15 мин.

Прогнозирование интенсивности эрозионных процессов проведено с использованием программного пакета ArcGIS 9.3. В основу ГИС исследуемого бассейна положен картографический материал, включающий топографическую карту М 1:10000 с сечением горизонталей 2 м, почвенную карту М 1:10000, аэрофотоснимок разрешением 1 м. Построение базы данных включает геопривязку, оцифровку базовых карт, создание растровых электронных тематических карт. В результате получена цифровая модель территории, где каждой точке соответствует набор среднестатистической информации о характеристиках рельефа, агрохимических и водно-физических свойствах почв.

Верификация модели снегонакопления и снеготаяния производится на основе установления коэффициентов стаивания для зимнего периода и главной фазы снеготаяния.

Последовательный подбор коэффициентов проводился с шагом 0,2 в интервале от 2,0 до 4,0. Рассчитанная для каждого коэффициента стаивания высота снежного покрова сравнивалась с данными натуральных наблюдений.

Установлено, что для главной фазы снеготаяния коэффициент стаивания составляет в среднем 3,5 мм/°С·день,



для зимнего – 0,75 мм/°С·день.

Рассчитанные на основе коэффициентов стаивания значения водоотдачи входят в модель аккумуляции талых вод, где для каждого отрезка склона определяется впитывающая способность почв и слой весеннего склонового стока. На основании рассчитанных значений весеннего склонового стока получены значения смыва почвы на водосборе с учетом землепользования для снеготаяния 2003–2005 годов. Сравнение результатов расчета с фактическими

данными показало, что среднее отклонение находится в пределах 17 %.

Для оценки эффективности противоэрозионных агротехнических мероприятий проведены сценарные исследования, включающие пять сценариев: зяблевая вспашка, безотвальная вспашка на глубину 20 см, глубокая безотвальная вспашка при возделывании озимых культур, возделывание озимых культур + безотвальная вспашка + щелевание (на 40...50 см с нарезанием щелей через 7...8 м) (рис. 1).

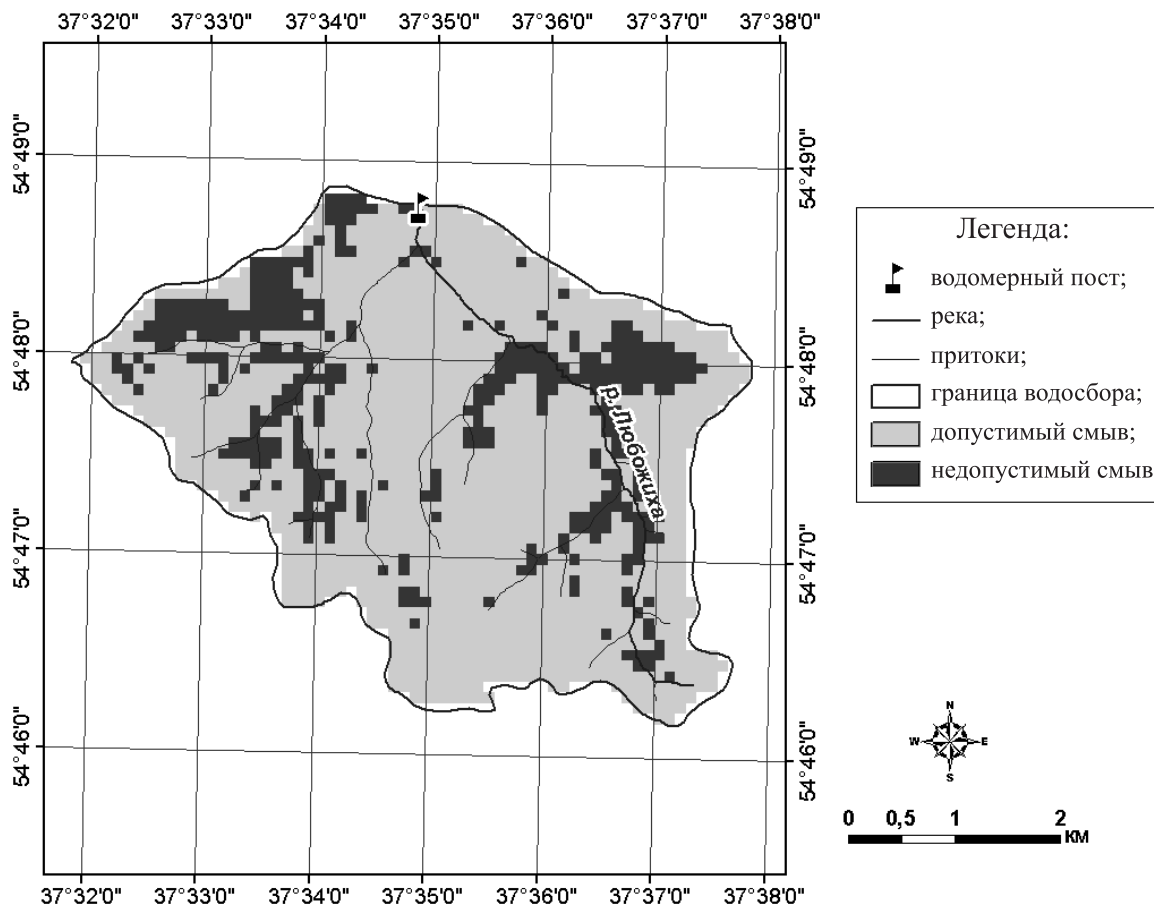


Рис. 1. Карта-схема прогноза смыва почвы при сценарии 1 (зяблевая вспашка)

Установлено, что применение различных приемов, увеличивающих впитывающую способность почв, приводит к сокращению площади земель с недопустимым смывом с 33 до 7 %. В результате проведенных исследований установлено, что для склоновых земель малого водосбора прослеживается дифференциация в применении агротехнических мероприятий и вида возделываемых культур.

ваемых культур.

На основе сценарных исследований разработана агроэкологическая классификация земель с обозначением противоэрозионных агроуправляющих мероприятий. Земельная территория бассейна реки Любожихи разделена на шесть категорий (рис. 2).

На землях первой категории (584 га) – водораздельные территории

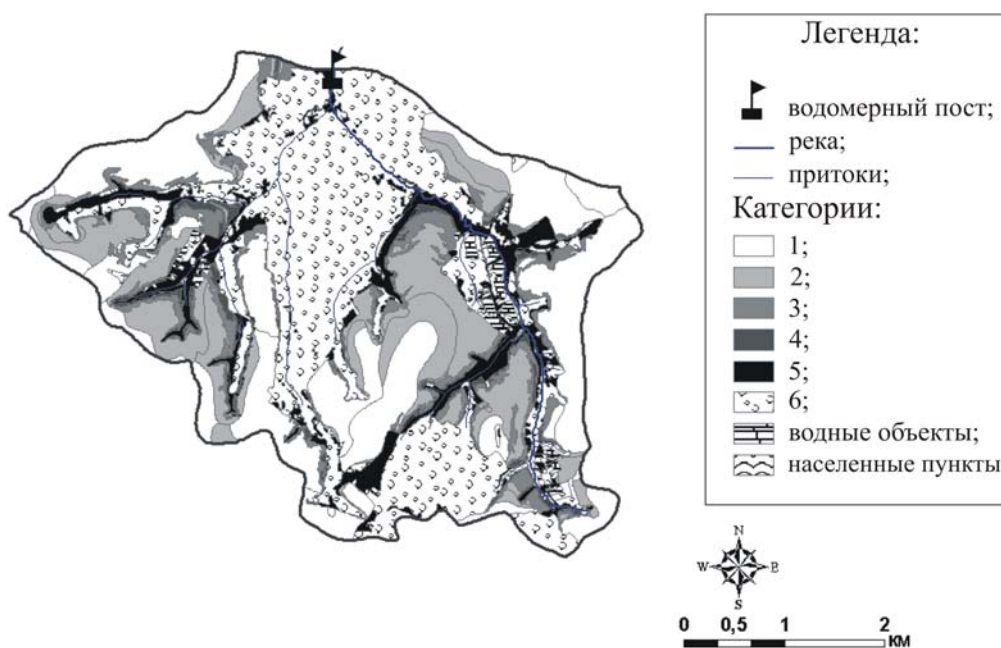


Рис. 2. Категории земель бассейна

и верхние части пахотных склонов с уклоном до  $1^\circ$ , местами до  $2^\circ$  – рекомендовано регулировать сток талых вод путем зяблевой вспашки. На этих землях возможно возделывание всех районированных культур.

На землях второй категории (251 га) – средние части длинных пахотных склонов крутизной  $2...3^\circ$  – рекомендованы специальные севооборотные массивы с увеличением доли многолетних трав. Противозерозионную защиту земель этой категории необходимо осуществлять с учетом регулирования поверхностного стока воды на землях категории 1. В качестве основных противозерозионных агротехнических приемов рекомендуется глубокая безотвальная вспашка. Эффективным мероприятием является полосное размещение культур сплошного сева по парам и зяби. Вместе с защитой склоновых земель от эрозии применение этих мероприятий обеспечивает влагонакопление в почве.

Третья категория (159 га) – нижние части склонов крутизной  $3...5^\circ$  и более. На данных землях рекоменду-

ется применение гребнистой вспашки, которая снижает смыл почв и усиливает накопление влаги. На этих землях размещают культуры сплошного сева с хорошими почвозащитными свойствами – озимые и яровые зерновые, бобовые, крупяные, однолетние и многолетние травы, а также подсевные и озимые промежуточные культуры. Допускается применение паров с посевом многолетних трав в виде буферных полос. Для увеличения водопроницаемости почв рекомендуется щелевание.

Четвертая категория (120 га) включает участки склонов от  $5$  до  $8^\circ$  с сильноэродированными почвами, а также участки заброшенных склонов, не используемых в сельскохозяйственном обороте из-за сильного разрушения эрозией. На этих землях рекомендуется размещать зернотравные почвозащитные севообороты, а после залужения отводить под пастбища. Земли, малоценные для сельскохозяйственного использования, отводятся под лес. Для защиты почв от эрозии на окультуренных пастбищах, засеянных кормовыми травосмесями,

и на пастбищах с разнотравьем рекомендуется ежегодное поздне-осеннее щелевание через 1...3 м на глубину 50...60 см.

Пятая категория (76 га) включает балочные и овражные земли (уклон более 8°). Такие земли необходимо использовать в качестве сенокосов и пастбищ. Основными мероприятиями борьбы с эрозией должны стать: устройство на пастбищах распылителей стока, водонаправляющих валов и нагорных каналов, водозадерживающих валов-террас с широким основанием.

Шестая категория (655 га) включает все имеющиеся в хозяйстве лесные насаждения и защитные лесные полосы на сельскохозяйственных землях, которые оказывают большое мелиорирующее воздействие на весь агроландшафт. Основное внимание должно быть обращено на повышение продуктивности этих насаждений.

*Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований А. С. Керженцеву, профессору, доктору биологических наук, и М. П. Волокитину, кандидату сельскохозяйственных наук (Институт фундаментальных проблем биологии РАН).*

1. Моделирование эрозионных процессов на территории водосборного бассейна / А. С. Керженцев [и др.]. – М.: Наука, 2006. – 224 с.

2. **Волков С. Н.** Землеустройство: соч. в 2 т. – М.: Колос, 2001. – Т. 2. – 684 с.

3. **Коронкевич И. И.** Водный баланс русской равнины и его антропогенные изменения. – М.: Наука, 1990. – 204 с.

4. **Ларионов Г. А.** Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 200 с.

5. **Барabanов А. Т.** Агроресомелиорация в почвозащитном земледелии. – Волгоград, 1993. – 68 с.

6. **Герасименко В. П.** Оценка весеннего поверхностного стока с пахотных земель // Почвоведение. – 1993. – № 5. – С. 84–91.

7 **Жилко В. В., Тишук Л. А.** Жидкий и твердый сток на склоновых землях // Почвоведение и агрохимия: сб. науч. трудов. – Вып. 27. – Минск: «Ураджай», 1991. – С. 28–46.

8. **M. Helms, O. Evdakov, J. Ihringer, F. Nestmann.** Modelling spring flood in the area of the Upper Volga basin // Adv. Geosci. – 2006. – № 9. – P. 115–122.

9. **Ясинский С. В., Гусев Е. М.** Динамико-стохастическое моделирование процессов формирования весеннего склонового стока на малых водосборах // Почвоведение. – 2003. – № 7. – С. 847–861.

10. **Bertle F. A.** Effect of Snow Compaction on Runoff from Rain on Snow; Bureau of Reclamation // Engineering Monograph. – 1966. – № 35. – 68 p.

11. Методы расчета и прогноза половодья для каскада водохранилищ и речных систем / А.П. Жидиков [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 128 с.

12. **Knauf D.** Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke; in Schriftenreihe des DVWK. – Heft 46. – 1980. – P. 95–135.

13. И. Л. Калюжный, Павлова К. К. Формирование потерь талого стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 160 с.

14. **Окулик Е. В.** Эрозия почв и миграция химических веществ с талым стоком (на примере серых лесных почв): автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 2006. – 25 с.

15. **Киселева О. Е.** Информационная технология поддержки принятия решений по выбору противоэрозионных агромелиоративных мероприятий в бассейнах малых рек : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 06.01.02. – М., 2008. – 25 с.

16. **Сухановский Ю. П.** Модель управления эрозионными процессами в агроландшафтах. – Курск, 2004. – 65 с.

Материал поступил в редакцию 29.04.09.

**Коломийцев Николай Владимирович,** кандидат геолого-минералогических наук, зам. директора

Тел. +7(495)976-42-72

E-mail kolomiytsev@vniigim.ru

**Киселева Ольга Евгеньевна,** кандидат технических наук

Тел. +7(495)976-02-71,

E-mail kiseleva@vniigim.ru, olgakiseleva@bk.ru