

Формирование поверхностного стока в горных лесах Южной Сибири

Ю. Н. КРАСНОЩЕКОВ, Г. Б. КОФМАН, Д. И. НАЗИМОВА

*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок*

АННОТАЦИЯ

Для модельного описания процессов формирования жидкого и твердого поверхностных стоков использованы экспериментальные данные, собранные в результате многолетних исследований и систематизированные по семи классам высотно-поясных комплексов (ВПК) типов леса. Проведенные исследования показали, что в качестве ключевой информативной переменной может быть использовано проективное покрытие, характеризующее как древостои (состав, полноту, возраст), так и долю живого напочвенного покрова. Построена унифицированная для всех ВПК система простых регрессионных моделей, описывающих размеры жидкого и твердого стоков в зависимости от проективного покрытия.

Исследование водоохранно-защитных функций лесов в горах с привлечением количественных методов является сложной экологической проблемой и требует интеграции знаний многих специалистов. Большое разнообразие природных условий в горах Южной Сибири, наличие длительной сезонной и многолетней мерзлоты в условиях резко континентального климата, характер растительности, изменяющийся в пределах высотных поясов (ВПК), определяют особую специфику защитных функций лесов в этом регионе. Лес, взаимодействуя с атмосферой, водой и почвой, оказывает на все компоненты биogeоценозов трансформирующее влияние, стабилизируя горные ландшафты.

Одним из интегральных показателей водорегулирующих и почвозащитных функций леса является поверхностный жидкий сток, который представляет часть не поглощенных растительностью и почвой атмосферных осадков. Процесс формирования жидкого и твердого поверхностных стоков связан с кли-

матическими, геоморфологическими, почвенными и биогенными факторами. Величина поверхностного жидкого стока может варьировать от 0,01 до 10 % от суммы осадков, модуль твердого стока колеблется от 0,1 до 10 т/км² в год, в отдельных районах достигая 20–50 т/км² [1]. В горах Хангая и Хэнтэя в Монголии [2] в псевдо- и подтаежных лиственных лесах поверхностный жидкий сток меньше 1 % от суммы осадков, а модуль твердого стока – не более 0,7 т/км².

Специальными исследованиями установлено, что в горах с выраженной высотной поясностью климата, почв и растительности существует четкая связь количественных характеристик стока с высотными поясами, причем наибольшая доля стока (до 80 %) приходится на верхние ВПК. Высокогорные и темнохвойные экосистемы фильтруют основную массу влаги, поступающую с гор, тогда как степные и лесостепные предгорные экосистемы почти не участвуют в формировании речного стока, и здесь они выполняют иные защитные функции [1, 3, 4]. Внутри

ВПК процесс формирования жидкого и твердого поверхностных стоков зависит от полноты и состава насаждений, возраста, проективного покрытия живого напочвенного покрова, типа леса, водно-физических свойств лесных подстилок и почв, которые существенно изменяются в процессе онтогенеза лесных экосистем. Влияние климатических и геоморфологических процессов на формирование стока определяется количеством, интенсивностью и эродирующей способностью дождя, длиной, крутизной и формой склонов [5–8]. Одним из параметров, позволяющих учитывать влияние биогенного процесса на формирование жидкого и твердого поверхностных стоков, является “эрозионный индекс агроценозов” [9].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования процесса формирования поверхностного стока проводились одним из авторов в течение 30 лет на 205 пробных площадях, заложенных в лесном поясе гор Южной Сибири, Забайкалья и Северной Монголии. За этот период создан банк данных по тринадцати параметрам, значения которых определяли по методикам, изложенным в работах [10–12]. Жидкий и твердый стоки измеряли объемным методом. В маршрутных исследованиях применяли метод искусственного дождевания микроплощадок [13]. Пробные площади систематизированы по таксонам биогеоклиматической классификации лесного покрова – высотнопоясным комплексам и их классам. Ранее показано [14], что классы ВПК в границах лесорастительных областей обладают высокой степенью общности типологического состава, структуры и продуктивности лесов. Этот уровень генерализации отражен на обзорных картах и объективно подтверждается информацией со спутников NOAA [15]. Ниже анализируются характеристики классов ВПК, свойственных наиболее континентальной части гор Южной Сибири – Алтайско-Тувинско-Хангайской провинции, Забайкалью и прилегающей части Монголии.

Подгольцовые леса и редколесья образуют верхнюю границу леса (абс. отм. 1700–2600 м) и приурочены к наиболее высоким

хребтам и водоразделам. Широко распространены здесь лиственничники, реже – кедровники V–Vб класса бонитета. В пределах гор Хангая и Прихубсугулья в почвенном покрове доминируют криоземы типичные и перегнойные, глееземы. Водопроницаемость почв при глубине оттаивания мерзлоты 30–60 см равна $(1,3 \pm 0,3) - (2,0 \pm 0,9)$ мм/мин. Поверхностный сток не превышает 1 % от суммы осадков. Эрозионный коэффициент изменяется от $2 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-6}$. Суммарный размер эрозии – не более 0,6 т/км² в год. Полученные данные свидетельствуют о том, что при низкой водопроницаемости почв проявление эрозионных процессов выражено очень слабо. Это связано, главным образом, с защитной ролью подстилки, которая при средней мощности 5–8 см, запасе 25–28 т/га обладает влагоемкостью 11–13 мм.

Горно-таежные леса образуют пояс в умеренно-влажных районах Прибайкалья (абс. отм. 900–1400 м), Прихубсугулья (абс. отм. 1400–1800 м), Забайкалья (абс. отм. 1100–1700 м). Наиболее широко распространены здесь подбуры типичные и перегнойные, подзолистые почвы.

Установлено, что мощность, запас и влагоемкость лесных подстилок в разных насаждениях колеблются в больших пределах. В кедровниках мощность их равна 3–5 см, запас – 9–29 т/га, а влагоемкость – 6–11 мм. В лиственничных насаждениях – соответственно 2–7 см, 7–34 т/га, 4–14 мм. Выявлена тенденция изменения этих параметров в зависимости от возраста и состава насаждений.

Важным в экологическом смысле свойством подстилки является перехват ею взвешенных в жидком стоке частиц размытых почв. Экспериментально установлено, что подстилки в пределах горно-таежного класса ВПК задерживают в среднем $(71,3 \pm 2,0) - (81,5 \pm 1,6)$ % взвешенных в жидком стоке твердых частиц. Водопроницаемость почв в пределах ВПК изменяется от 200 и более до $(9,9 \pm 1,2)$ мм/мин, снижаясь от водоразделов и верхних частей склонов к подошвам склонов и понижениям.

В лесах горно-таежного лиственничного ВПК, не нарушенных вырубками, поверхностный сток характеризуется очень малыми величинами и не превышает 1,1 % от суммы осадков. Модуль твердого стока состав-

ляет $0,001-3,2 \text{ т/км}^2$ в год. Эрозионные коэффициенты очень низкие – $1 \cdot 10^{-5} - 15 \cdot 10^{-5}$.

Приведенные данные характеризуют высокую почвозащитную роль лесов, произрастающих на длительно сезонно-мерзлых почвах.

В суровых условиях сильно затененных склонов и шлейфов в пределах таежного лиственничного ВПК развиваются леса багульниково-моховой группы на криоземах, а также типичных и оподзоленных глееземах. Водопроницаемость их низкая и изменяется от $(0,5 \pm 0,1)$ до $(1,2 \pm 0,4)$ мм/мин. Поверхностный сток в лесу не превышает $0,3 \%$ от суммы осадков. В данном случае формированию стока препятствует высокая влагоудерживающая способность ($15-26 \text{ мм}$) лесных подстилок запасом $30-46 \text{ г/га}$. Низкие размеры эрозии под пологом леса связаны и с высокой аккумулярующей способностью подстилки, которая задерживает $(92,2 \pm 2,3) \%$ частиц размытых почв. Суммарный размер эрозии под пологом леса составляет $0,02-8,2 \text{ т/км}^2$ в год. Эрозионный коэффициент изменяется от $1 \cdot 10^{-4}$ до $48 \cdot 10^{-4}$.

Псевдотаежные лиственничные леса формируются в резко континентальных условиях высокогорий Хангая, где они занимают господствующее положение в спектре ВПК лесной растительности. Этот класс лесных экосистем имеет наибольшие отличия по типологическому составу и наиболее своеобразные особенности гидрологического режима [16].

Установлено, что высокополнотные древостои лиственницы в псевдотаежном ВПК с сомкнутостью крон $0,7$ задерживают в среднем 29% жидких осадков, средне- и низкополнотные с сомкнутостью крон $0,47$ и $0,27$ – соответственно 23 и 13% . Наблюдается зависимость между силой осадков и их задержанием кронами отдельных насаждений.

В период снеготаяния талый поверхностный сток в лесу не превышает $0,5-0,8 \%$ от суммы осадков, на вырубках и гарях он увеличивается до $5-4$, а в отдельных случаях – до $69-72 \%$. Эрозионный коэффициент низкий и изменяется от $67 \cdot 10^{-6}$ до $18 \cdot 10^{-7}$. В летний период, когда выпадает осадков $75-85 \%$ годовой нормы, поверхностный сток под пологом леса не превышает $1-2 \%$ от суммы осадков. Низкие величины стока связаны с высокой водопроницаемостью мерзлотных почв ($(10,5 \pm 2,6)-(16,3 \pm 4,2)$ мм/мин), обус-

ловленной наличием в почвенном профиле горизонтов “сухой” мерзлоты, а также с высокой влагоемкостью подстилок ($10-13 \text{ мм}$). Эрозионные коэффициенты изменяются от $9 \cdot 10^{-7}$ до $65 \cdot 10^{-5}$, суммарный размер эрозии не превышает $3,0 \text{ т/км}^2$ в год.

Подтаежный и подтаежно-лесостепной классы ВПК образуют среднюю и нижнюю части лесного пояса в рассматриваемых провинциях. В условиях высокой континентальности климата в почвенном покрове широко распространены подзолистые, дерново-подзолистые, дерновые и дерново-карбонатные и лугово-лесные холодные и глубокомерзлотные почвы. Водопроницаемость холодных почв в пределах ВПК изменяется от $(85,0 \pm 8,6)$ до $(10,4 \pm 2,5)$ мм/мин. Глубокомерзлотные почвы при глубине оттаивания $150-170 \text{ см}$ имеют водопроницаемость $(28,2 \pm 4,0)$ мм/мин. Мощность, запас и влагоемкость подстилок варьируют в больших пределах (мощность – от $(2,6 \pm 1,0)$ до $(1,0 \pm 0,1)$ см; запас – от $(18,5 \pm 5,6)$ до $(4,1 \pm 0,8)$ т/га; влагоемкость – от $(5,0 \pm 1,2)$ до $(0,7 \pm 0,2)$ мм). Наиболее низкие параметры характерны для сосняков и лиственничников остепненно-разнотравной серии типов леса. Величина поверхностного стока под пологом леса не превышает в большинстве случаев 5% от суммы осадков. Наиболее высокие значения свойственны остепненно-разнотравным ($K_{\text{ст}} = 0,16 \pm 0,05$) и мертвопокровным ($K_{\text{ст}} = 0,22 \pm 0,08$) насаждениям. Эрозионные коэффициенты равны $2 \cdot 10^{-5}-118 \cdot 10^{-4}$, суммарный размер эрозии не превышает 52 т/км^2 в год. Наиболее высокие размеры эрозии под пологом леса ($30-52 \text{ т/км}^2$ в год) приурочены к участкам с лессовидными покровными отложениями, обладающими очень низкой устойчивостью к размыву.

Для модельного описания процессов формирования жидкого и твердого поверхностных стоков использована уникальная база, собранная в результате многолетних исследований, в которой приведены экспериментальные данные, систематизированные по семи классам ВПК типов леса: подгольцово-таежный, таежный темнохвойный, таежный лиственничный, лиственничный мерзлотный, псевдотаежный лиственничный, подтаежный (лиственничный и сосновый ВПК рассмотрены по отдельности).

Одной пробной площади соответствует совокупность тринадцати параметров (в скобках указан диапазон изменения их значений):

P_1 – твердый сток, т/км² в год ($0,001 \leq P_1 \leq \leq 52,95$);

P_2 – жидкий сток, мм в год ($0,04 \leq P_2 \leq \leq 268,40$);

P_3 – запас подстилки, т/га ($1,60 \leq P_3 \leq \leq 50,00$);

P_4 – влагоемкость подстилки, мм ($0,40 \leq \leq P_4 \leq 28,00$);

P_5 – водопроницаемость почв, мм/мин ($0,10 \leq P_5 \leq 529,0$);

P_6 – гранулометрический состав почв (содержание частиц <0,01 мм), % ($12,0 \leq P_6 \leq 57,0$);

P_7 – крутизна склона, градус ($4,0 \leq P_7 \leq 30,0$);

P_8 – годовое количество осадков, мм ($273 \leq P_8 \leq 1020$);

P_9 – доля хвойных в составе насаждений, % ($10 \leq P_9 \leq 100$);

P_{10} – доля лиственных в составе насаждений, % ($0 \leq P_{10} \leq 90$);

P_{11} – полнота насаждений, доля от единицы ($0,03 \leq P_{11} \leq 1,30$);

P_{12} – возраст насаждений, лет ($22,0 \leq P_{12} \leq \leq 350,0$);

P_{13} – проективное покрытие напочвенного покрова, % ($10 \leq P_{13} \leq 100$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимости между поверхностным твердым P_1 и жидким P_2 стоками приведены в таблице (уравнение 3 для каждого ВПК). Для всех ВПК высокие значения коэффициентов детерминации – R^2 наблюдаются уже в простейшем случае линейных зависимостей $P_1 = a + b \cdot P_2$, проходящих через начало координат (рис. 1). Пропорциональность ($a = 0$) твердого и жидкого стоков кажется вполне логичной, поскольку при отсутствии жидкого стока ($P_2 = 0$) не должно быть и твердого ($P_1 = 0$). С другой стороны, для полного уравнения при $a < 0$ прямые 1–3 пересекали бы ось абсцисс в точках $P_1 = 0$ и $P_2 > 0$. Это обстоятельство означало бы существование порогового эффекта – возникновение твердого стока, начиная с определенных (порого-

Зависимости жидкого (P_2) и твердого (P_1) стоков от проективного покрытия (P_{13}) – уравнения (1) и (2), и твердого стока от жидкого – (3) для некоторых ВПК

| ВПК | Уравнения | R^2 |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| Подгольцово-таежный* | 1. $P_2 = -0,0356P_{13} + 3,6028$ | 0,439 |
| | 1а. $P_2 = 0,2019P_{13} - 2,1995$; при $P_5 \leq 2$ мм/мин | 0,773 |
| | 2. $P_1 = 0,0002P_{13}^2 - 0,027P_{13} + 1,1425$ | 0,492 |
| | 2а. $P_1 = -0,0004P_{13}^2 + 0,0124P_{13} + 0,5215$; при $P_7 > 20^\circ$ | 0,783 |
| Таежный лиственный* | 1. $P_2 = 0,0138P_{13}^2 - 2,4054P_{13} + 104,4$ | 0,514 |
| | 1а. $P_2 = 0,0204P_{13}^2 - 3,785P_{13} + 175,29$; при $P_{10} > 15$ % | 0,987 |
| | 2. $P_1 = -0,0208P_{13} + 1,8967$ | 0,513 |
| | 2а. $P_1 = -0,0368P_{13} + 3,3185$; при $P_{10} > 15$ % | 0,858 |
| | 3. $P_1 = 0,031P_2$ | 0,728 |
| Лиственный мерзлотный* | 1. $P_2 = 0,0095P_{13}^2 - 1,6627P_{13} + 73,867$ | 0,897 |
| | 1а. $P_2 = 0,0096P_{13}^2 - 1,739P_{13} + 79,18$; при $P_8 > 30$ % | 0,978 |
| | 2. $P_1 = 0,0014P_{13}^2 - 0,2602P_{13} + 12,402$ | 0,789 |
| | 2а. $P_1 = 0,0014P_{13}^2 - 0,2677P_{13} + 13,156$; при $P_8 > 30$ % | 0,948 |
| | 3. $P_1 = 0,183P_2$ | 0,901 |
| Псевдотаежный лиственный | 1. $P_2 = 0,006P_{13}^2 - 1,664P_{13} + 112,63$ | 0,727 |
| | 2. $P_1 = 8E-05P_{13}^2 - 0,00226P_{13} + 1,5081$ | 0,637 |
| | 3. $P_1 = 0,012P_2$ | 0,840 |
| Подтаежный лиственный | 1. $P_2 = 0,0125P_{13}^2 - 2,3552P_{13} + 113,02$ | 0,724 |
| | 2. $P_1 = 0,0053P_{13}^2 - 1,1005P_{13} + 58,929$ | 0,868 |
| | 3. $P_1 = 0,478P_2$ | 0,893 |

Примечание. Звездочкой отмечены ВПК, для которых построены зависимости (1а)-(2а) при фильтрации по дополнительным переменным.

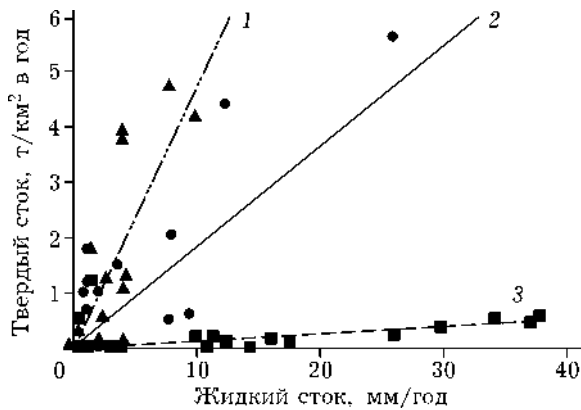


Рис. 1. Взаимосвязи твердого и жидкого стоков для лиственнично-подтаежного – 1, лиственнично-мерзлотного – 2 и псевдотаежного – 3 ВПК.

вых) для каждого ВПК значений $P_{2\text{порог}} > 0$. К сожалению, систематических, достоверных различий между полными и усеченными линейными зависимостями обнаружить не удалось, хотя в некоторых случаях данный эффект вполне просматривается.

Угловые коэффициенты прямых 1–3 отличаются в 15 раз (см. таблицу), существуют и более “крутые” зависимости (большие значения P_2 при данном P_1), что связано с разной противэрозионной устойчивостью почв в данных ВПК (см. рис. 1).

Для построения нелинейных многофакторных моделей, адекватно отражающих процессы формирования жидкого и твердого поверхностных стоков в разных ВПК, необходимы большие массивы экспериментальных данных (не менее 10–15 наблюдений на каждую переменную). Существующая база данных содержит от 20 до 41 пробной площади в каждом ВПК. Поскольку характерные значения переменных в различных ВПК отличаются на 1–2 порядка и механическое объединение выборок нецелесообразно, то основное внимание было уделено построению однофакторных моделей, описывающих зависимость формирования жидкого и твердого поверхностных стоков. Помимо уже известных в лесной гидрологии зависимостей формирования стоков от величины осадков, крутизны склона и т. д. важно было обнаружить влияние на этот процесс биогенного фактора – лесной растительности. Проведенные исследования показали, что в качестве ключевой информативной переменной может

быть использовано проективное покрытие – P_{13} , объединяющее характеристики как древостоев (состав, полноту, возраст), так и почвенного покрова (долю проективного покрытия живого напочвенного покрова). С использованием проективного покрытия построена унифицированная для всех ВПК система моделей, описывающих размеры жидкого и твердого стоков в зависимости от P_{13} . Все полученные коэффициенты и уравнения в целом (см. таблицу) достоверны на уровне значимости $\alpha = 0,05$, общепринятом в практике биологических исследований. В этой же таблице приведены значения коэффициентов детерминации (R^2), определяющих достаточность использования независимой переменной (в нашем случае P_{13}) для объяснения механизмов формирования стоков.

Поскольку максимальное значение $R^2 = 1$, что для псевдотаежного лиственничного и подтаежного лиственничного ВПК использование проективного покрытия вполне достаточно ($0,7 < R^2 < 0,9$), а для остальных рассматриваемых ВПК влияние P_{13} , хотя и достоверно, объясняет далеко не всю изменчивость формирования стоков. Здесь необходимо использование и других переменных, также влияющих на исследуемый процесс. Выбор этих переменных для каждого ВПК проведен с помощью дополнительной фильтрации исходного материала, например, по водопроницаемости почв (P_5) для жидкого стока и крутизне склона (P_7) для твердого стока в подгольцово-таежном ВПК. Значения R^2 выросли почти в 2 раза (см. таблицу), и это означает, что переменные P_5 и P_7 должны быть включены в модель, описывающую сток. Аналогичный результат с дополнительной фильтрацией, но уже по составу насаждений (P_{10}), получен в таежном лиственничном ВПК. Результаты фильтрации при $P_6 > 30\%$ для лиственнично-мерзлотного ВПК приведены на рис. 2. В обоих случаях отчетливо видны улучшение качества выравнивания для подвыборок и, следовательно, необходимость использования гранулометрического состава почв (P_6) для описания стока в данном ВПК. В каждом из высотно-поясных комплексов найдены “индивидуальные” переменные, улучшающие “работоспособность” основных зависимостей $P_1 = F(P_{13})$ и $P_2 = F(P_{13})$, и, возмож-

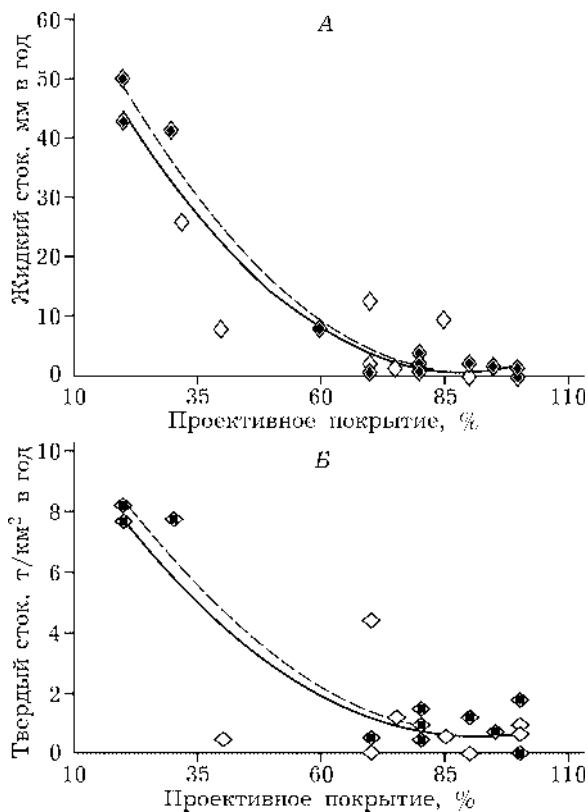


Рис. 2. Зависимости жидкого – А и твердого – Б стоков от проективного покрытия на примере лиственнично-мерзлотного ВПК. В обоих случаях сплошные линии и “открытые” ромбики соответствуют всему набору пробных площадей ($n = 25$), а пунктирные линии и “двойные” ромбики – подвыборкам ($n = 13$) при $P_6 > 30\%$.

но, эта индивидуальность дополнительных переменных и отражает специфические особенности формирования стока в различных ВПК.

Полученные результаты свидетельствуют о плодотворности используемого подхода и могут с успехом применяться как для соп-

ставления механизмов формирования, так и для оценки степени влияния различных факторов на жидкий и твердый стоки конкретных ВПК типов леса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 00-04-48-608 и Красноярского фонда КФФН, грант 10F-075.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лебедев, Гидрологическая роль горных лесов Сибири, Новосибирск, Наука, Сиб отд-ние, 1982, 182.
2. Ю. Н. Краснощеков, *География и природ. ресурсы*, 2001, 1, 135-142.
3. Средаобразующая роль лесов бассейна озера Байкал, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1979.
4. Н. П. Поликарпов, Н. М. Чебакова, Д. И. Назимова, *Климат и горные леса Южной Сибири*, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1986.
5. Н. А. Трубухин, *Метеорология и гидрология*, 1983, 7, 93-100.
6. Г. А. Ларионов, *Актуальные вопросы эрозиоведения*, М., Колос, 1984, 41-66.
7. Дж. К. Митчел, Г. Д. Бубензер, *Эрозия почвы*, М., Колос, 1984, 34-95.
8. Ю. А. Чеботарев, *Моделирование процессов гидросферы, атмосферы и ближнего космоса*, Новосибирск, Наука, Сиб отд-ние, 1985, 94-101.
9. Ю. Г. Жаркова, *Работа водных потоков*, М., МГУ, 1987, 39-51.
10. А. А. Молчанов, *Гидрологическая роль леса*, М., Изд-во АН СССР, 1960.
11. А. Ф. Вадюнина, З. А. Корчагина, *Методы исследования физических свойств почв и грунтов*, М., Высш. шк., 1973.
12. В. Н. Сукачев, С. В. Зонн, *Методические указания к изучению типов леса*, М., Изд-во АН СССР, 1971.
13. Г. И. Швец, *Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка*, Л., Гидрометеиздат, 1974.
14. *Типы лесов гор Южной Сибири*, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1981.
15. Д. И. Назимова, Н. П. Поликарпов, А. И. Сухинин и др., *Лесоведение*, 2001, 4, 25-31.
16. *Леса МНР (лиственничные леса Центрального Хангая)*, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1983.

Formation of the Surface Outflow in Mountain Forests of South Siberia

Yu. N. KRASNOSHCHKOV, G. B. KOFMAN, D. I. NAZIMOVA

For a model description of processes of formation of liquid and solid surface outflows, experimental data collected as a result of multiannual systematized over seven classes of high-zone forest type complexes were used. The carried out studies have demonstrated that the projective cover characterizing both tree stands (composition, completeness, age) and the proportion of living surface cover may be used as the key information variable. A system of simple regression models describing the dimensions of liquid and solid outflows depending on the projective cover unified for all high-zone complexes has been constructed.