ФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЖИДКОГО И ТВЕРДОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА В ГОРНЫХ ЛЕСАХ ЮЖНОЙ СИБИРИ*

Н.М. Андреева, Ю.Н. Краснощекоев, Д.И. Назимова**

Построена факторная модель параметров процесса формирования жидкого и твердого поверхностного стока в лесном поясе гор Южной Сибири. Методом главных компонент получена многомерная статистическая оценка доли общности процесса, определена доля дисперсии каждого из параметров, которая обусловлена совместным влиянием обобщенных факторов.

Исследование водоохранно-защитных функций лесов в горах с привлечением количественных методов является актуальной задачей горного лесоводства. Большое разнообразие природных условий в горах Южной Сибири, наличие длительносезонной и многолетней мерзлоты в почвенном профиле, сильно изменяющиеся в пределах высотно-поясных комплексов (ВПК) типы леса определяют специфику защитных функций, масштабы которых изменяются в широких пределах и не всегда сравнимы с проявлением этих функций в других горных системах Евразии. Лес, взаимодействуя с атмосферой, водой и почвой, оказывает на эти компоненты биосферы трансформирующее влияние, поддерживая их качественные и количественные характеристики. Процесс формирования жидкого и твердого поверхностного стока связан с климатическими, геоморфологическими, почвенными и биогенными факторами.

Поверхностный сток в лесу представляет часть не поглощенных растительностью и почвой атмосферных осадков. Механизм его образования под пологом тесно связан с влиянием леса на атмосферные осадки, с изменением влагоемкости подстилки и почв и их водно-физических свойств. По данным А.В. Лебедева [1], в горных системах юга Средней Сибири и бассейна оз. Байкал в ненарушенных лесах величина поверхностного жидкого стока составляет от 0,01% до 10% от суммы осадков, модуль твердого стока колеблется от 0,1 т/км² до 10 т/км² в год, в отдельных районах достигает величины 20-50 т/км². В горах Хангая и Хэнтэя в Монголии [2] в псевдотаежных и подтаежных лиственных лесах поверхностный жидкий сток менее 1% от суммы осадков, а модуль твердого стока не более 0,7 т/км².

Многочисленные экспериментальные исследования в горных системах показали, что процесс формирования жидкого и твердого поверхностного стока 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 в формировании стока отражается параметрами: количество, интенсивность и эродирующая способность дождя, длина, крутизна и форма склонов [3, 4, 5, 6]. Одним из параметров, позволяющих учитывать влияние биогенного процесса на формирование жидкого и твердого поверхностного стока, является "эрозионный индекс агроценозов" [7].

Экспериментальные исследования процесса формирования поверхностного стока проводились в течение 30 лет на 205 пробных площадях, заложенных в лесном поясе гор Южной Сибири и Забайкалья. За этот период были собраны данные по тринадцати параметрам, значения которых определяли по методикам, изложенным в работах [8, 9, 10]. Жидкий и твердый сток определяли объемным методом. В маршрутных исследованиях применяли метод искусственного дождевания микроплощадок [11]. Пробные площади систематизированы по таксонам биогеоклиматической классификации лесного покрова - ВПК, этот уровень генерализации объективно подтвержден информацией со спутников о функционировании лесных экосистем в горах [12, 13]. В данной работе рассмотрены семь ВПК: подгольцово-таежный, таежный темнохвойный, таежный лиственный, лиственный мерзлотный, псевдотаежный лиственный, подтаежный лиственный, подтаежный сосновый.

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

- P₁ - твердый сток, т/км² в год (0,001 ≤ P₁ ≤ 52,95);
- P₂ - жидкий сток, мм в год (0,04 ≤ P₂ ≤ 268,40);
- P₃ - запас подстилки, т/га (1,60 ≤ P₃ ≤ 50,00);
- P₄ - влагоемкость подстилки, мм (0,40 ≤ P₄ ≤ 28,00);
- P₅ - водопроницаемость почв, мм/мин (0,10 ≤ P₅ ≤ 529,0);
- P₆ - гранулометрический состав почв (содержание частиц < 0,01 мм), % (12,0 ≤ P₆ ≤ 57,0);
- P₇ - крутизна склона, градус (4,0 ≤ P₇ ≤ 30,0);
- P₈ - годовое количество осадков, мм (273 ≤ P₈ ≤ 1020);
- P₉ - % хвойных в составе насаждений (10 ≤ P₉ ≤ 100);
- P₁₀ - % лиственных в составе насаждений (0 ≤ P₁₀ ≤ 90);
- P₁₁ - полнота насаждений, доля от единицы (0,03 ≤ P₁₁ ≤ 1,30);
- P₁₂ - возраст насаждений, лет (22,0 ≤ P₁₂ ≤ 350,0);

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

При построении факторной модели процесса формирования поверхностного жидкого и твердого стока предполагается, что каждый из тринадцати перечисленных параметров представляет собой конечный результат совместного влияния некоторых, непосредственно не наблюдаемых факторов:

- общих для всех параметров - факторов, связанных значимыми коэффициентами корреляции с более чем одним параметром,
- индивидуальных, отражающих специфичность одного исходного параметра.

Количество общих факторов заранее не известно. Общие и индивидуальные факторы являются гипотетическими, их значения невозможно измерить непосредственно. Задача состоит в определении количества общих факторов и оценке их влияния на параметры формирования процесса поверхностного стока. Для построения статистической оценки влияния этих факторов используют модель факторного анализа, метод главных компонент. Дисперсия каждого исходного параметра интерпретируется как сумма дисперсии, обусловленной наличием общих факторов (общностью) и дисперсии, обусловленной вариацией каждого исходного параметра (специфичностью). Гипотетические факторы вводят таким образом, чтобы коэффициенты корреляции отвечали условиям, оговоренным в [14,15].

Доля общности процесса формирования поверхностного стока определяется для всего лесного пояса гор Южной Сибири в целом и по каждому из семи ВПК.

N - число пробных площадей на объекте расчета, в случае обследования лесного пояса в целом $N=205$.

Данные экспериментальных исследований представлены в виде матрицы значений параметров:

$$X = (x_{ji}), \quad j = 1, 2, \dots, 13, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Строка матрицы состоит из N значений одного параметра, соответствующих пробным площадям объекта исследования. Столбец матрицы соответствует одной пробной площади и содержит тринадцать параметров процесса формирования поверхностного стока, определенных на этой площади: $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}$.

Факторная модель процесса формирования поверхностного стока строится в предположении, что каждый элемент матрицы X является результатом воздействия совокупности m гипотетических общих факторов

$$F_k = (f_{ki}), \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

и 13-ти характерных (индивидуальных) факторов, каждый из которых отражает специфику одного параметра:

$$V_k = (v_{ki}), \quad k = 1, 2, \dots, 13, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Значения исходных параметров могут быть представлены в виде линейной комбинации гипотетических факторов:

$$x_{ji} = \sum_{k=1}^m a_{jk} f_{ki} + d_{ji} v_{ji}, \quad j = 1, 2, \dots, 13, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad i = 1, 2, \dots, 205 \quad (1)$$

где x_{ji} – значение j -го параметра на i -ой пробной площади;

f_{ki} - значение k -го общего фактора на i -ой пробной площади;

v_{ji} - значение j -го индивидуального фактора на i -ой пробной площади;

a_{jk} - весовой коэффициент (нагрузка) j -го параметра на k -ом общем факторе;

d_{ji} - весовой коэффициент (нагрузка) j -го параметра на i -ом индивидуальном факторе.

Для проведения статистической обработки необходимо перейти к стандартизованным значениям $Y=(y_{ji})$, $j=1,2,\dots,13, i=1,2,\dots,N$. Среднее значение стандартизованного параметра равно нулю, а дисперсия единице. Значения исходных параметров преобразуются:

$$y_{ji} = \frac{x_{ji} - \bar{x}_j}{S_j}, \quad j = 1, 2, \dots, 13, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где y_{ji} - нормированное значение j -го параметра на i -ой пробной площади;

x_{ji} - исходное значение j -го параметра на i -ой пробной площади;

$\bar{x}_j$ - среднее арифметическое значение j -го параметра по пробным площадям объекта исследования (по всем пробным площадям лесного пояса в целом или по отдельному ВПК);

S_j - среднее квадратическое отклонение j -го параметра по выбранному объекту исследования (по всем пробным площадям лесного пояса в целом или по отдельному ВПК):

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_{ji} - \bar{x}_j)^2}{N-1}}$$

Преобразование (1) приводит к выражениям для элементов матрицы стандартизованных параметров $Y=(y_{ij})$:

$$y_{ji} = \sum_{k=1}^m \hat{a}_{jk} \hat{f}_{ki} + \hat{d}_j \hat{v}_{ji}, \quad j=1, 2, \dots, 13, \quad k=1, 2, \dots, m, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где $\hat{a}_{jk}$ - весовой коэффициент (нагрузка) j -го параметра на k -ом нормированном общем факторе,

$\hat{f}_{ki}$ - нормированное значение k -го общего фактора на i -ой пробной площади,

$\hat{d}_j$ - весовой коэффициент (нагрузка) j -го параметра на j -ом нормированном индивидуальном факторе,

$\hat{v}_{ji}$ - нормированное значение j -го индивидуального фактора на i -ой пробной площади

Общие факторы не коррелированы и имеют единичные дисперсии, индивидуальные факторы не коррелированы, общие и индивидуальные факторы не коррелированы между собой. В этих условиях в результате факторного анализа с использованием метода главных компонент получены оценки: количества общих факторов (m), значения общих и индивидуальных факторов и факторные нагрузки: $\hat{f}_{ki}, \hat{v}_{ji}, \hat{a}_{jk}, (j=1, 2, \dots, 13, k=1, 2, \dots, N)$ для пробных площадей всего лесного пояса в целом и по каждому ВПК в отдельности.

Средствами ППП STATISTICA был проведен факторный анализ по каждому из семи классов ВПК типов леса и по всему лесному поясу в целом гор Южной Сибири.

На первом этапе была получена матрица нормализованных значений исходных параметров. Затем определена матрица парных коэффициентов корреляции приведенных параметров. Общая дисперсия процесса формирования поверхностного жидкого и твердого стока в терминах стандартизованных параметров равна 13 (сумма диагональных элементов матрицы корреляции нормированных признаков). В ППП STATISTICA был выбран

Таблица 1

Доли дисперсии процесса формирования поверхностного стока, объясняемые действием двух общих факторов (общностью процесса)

ВПК	Число параметров в факторной модели	Общая дисперсия процесса	Обобщенные факторы	Вклад каждого фактора в общую дисперсию процесса	Доля вклада фактора в дисперсию процесса, доля от единицы	Доля общности в дисперсии процесса, %
Подгольцово-таежный	11	11	Фактор 1	6,28	0,57	70%
			Фактор 2	1,44	0,13	
Таежный темнохвойный	12	12	Фактор 1	6,51	0,54	68%
			Фактор 2	1,67	0,14	
Таежный лиственничный	12	12	Фактор 1	6,89	0,53	71%
			Фактор 2	2,28	0,18	
Лиственничный мерзлотный	13	13	Фактор 1	7,38	0,57	68%
			Фактор 2	1,51	0,12	
Псевдотаежный лиственничный	11	11	Фактор 1	7,93	0,72	81%
			Фактор 2	1,01	0,09	
Подтаежный лиственничный	13	13	Фактор 1	6,41	0,49	64%
			Фактор 2	1,93	0,15	
Подтаежный сосновый	13	13	Фактор 1	7,16	0,55	69%
			Фактор 2	1,80	0,14	
Весь лесной пояс в целом	13	13	Фактор 1	4,77	0,37	54%
			Фактор 2	2,31	0,18	

метод “Scree test” (“каменистой осыпи”) для определения числа общих факторов, которые объясняют основную часть (более 70%) суммарной дисперсии процесса формирования поверхностного стока. В этом методе все собственные числа матрицы корреляции упорядочиваются по убыванию. Порядковый номер собственного значения, начиная с которого убывание замедляется наиболее резко, определяет число общих факторов. Модуль собственного значения матрицы корреляции, соответствующий общему фактору больше единицы. Методом главных компонент позволяет выявить общие факторы. Общие факторы интерпретируют большую часть общей дисперсии процесса, они служат интегральными характеристиками процесса формирования поверхностного жидкого и твердого стока.

В табл. 1 приведены доли дисперсии процесса, которые можно объяснить действием двух обобщенных факторов (общностью процесса). В табл. 2 приведены факторные нагрузки двух обобщенных факторов (их вклад в дисперсию каждого из исходных параметров) для каждого ВПК и по всему лесному поясу в целом. Элементы таблицы – коэффициенты корреляции исходных параметров и обобщенных факторов (*Фактора 1* и *Фактора 2*). Противоположные знаки факторных нагрузок говорят о прямых и обратных зависимостях дисперсий исходных параметров и общих факторов. Значимыми считаются элементы, чьи значения по абсолютной величине больше 0,7 (в таблице они выделены серым цветом). В отдельной строке таблицы для каждого ВПК приведена оценка доли дисперсии параметра, объясняемая общностью. Проценты хвойных (P_9) и лиственных (P_{10}) в составе насаждений на некоторых ВПК имели постоянные значения. Эти параметры исключались из расчетов, в табл. 2 они отмечены звездочкой, для них нет расчетных значений нагрузки в общих факторах.

В подгольцово-таежном и псевдотаежном лиственничном ВПК проценты хвойных и лиственных в составе насаждений имеют одно и то же значение для всех пробных площадей, эти два параметра были исключены из расчетов по этим ВПК, при формировании общих факторов здесь учитывались 11 параметров.

Для таежного темнохвойного и таежного лиственничного ВПК процент хвойных в составе насаждений находится в линейной зависимости от процента лиственных, этот параметр был исключен из расчетов по этим ВПК. Расчет проводился по 12 параметрам.

Расчеты, проведенные по пробным площадям всего лесного пояса гор Южной Сибири, показали, что доля общности в дисперсии параметров невелика, большая часть приходится на характерные факторы.

Наиболее значимую долю дисперсии параметров объясняет совокупность найденных гипотетических факторов (*Фактор 1* и *Фактор 2*): в лиственничном мерзлотном ВПК от 94% до 97% это твердый сток (P_1), жидкий сток (P_2) и проективное покрытие напочвенного покрова (P_{13}).

В подгольцово-таежном ВПК такими параметрами являются жидкий сток (P_2), крутизна склона (P_7) и возраст насаждений (P_{12}), доля общности в дисперсии этих параметров составляет здесь от 93% до 97%. В псевдотаежном лиственничном и в подтаежном лиственничном ВПК наиболее полно (от 94% до 95%) интерпретируются дисперсии твердого и жидкого стока (P_{11} , P_2).

Значительная доля дисперсии (91-95%) объясняется общностью процесса на каждом из ВПК для следующих параметров: твердый сток (P_1), жидкий сток (P_2), годовое количество осадков (P_8). При расчетах по всему лесному поясу гор Южной Сибири в целом доля общности в дисперсии параметров значительно ниже, она не превосходит 78-81%.

Оценку интегральной характеристики дисперсии процесса формирования поверхностного жидкого и твердого стока можно построить, используя факторные нагрузки, приведенные в табл. 2. Параметры, доля которых в дисперсии *Фактора 1* превышает 0,7, выделены в табл. 2 серым цветом. Например, в псевдотаежном лиственничном ВПК *Фактор 1* можно оценить следующей величиной:

$$\text{Фактор } 1 = -0,91P_1 - 0,95P_2 + 0,86P_3 + 0,95P_4 + 0,86P_5 - 0,84P_7 - 0,88P_8 + 0,84P_{12} + 0,9P_{13}.$$

По такой же схеме оцениваются интегральные характеристики процесса формирования стока и по другим рассмотренным ВПК.

Доля общности в дисперсии признаков:

твердый сток (P_1) - 97% в лиственничном мерзлотном ВПК, 94% в псевдотаежном лиственничном ВПК и 93% в подтаежном лиственничном ВПК;

жидкий сток (P_2) - 94% в подгольцово-таежном ВПК, 97% в лиственничном мерзлотном ВПК, 95% в псевдотаежном лиственничном ВПК, 94% в подтаежном лиственничном ВПК и 90% в подтаежном сосновом ВПК;

запас подстилки (P_3) - 93% в подгольцово-таежном ВПК;

влагоемкость подстилки (P_4) - 97% в псевдотаежном лиственничном ВПК;

водопроницаемость почв (P_5) - 89% в подгольцово-таежном ВПК, 86% в псевдотаежном лиственничном ВПК;

гранулометрический состав почв (P_6) - 86% в подгольцово-таежном ВПК;

крутизна склона (P_7) - 97% в подгольцово-таежном ВПК;

годовое количество осадков (P_8) - 91% в псевдотаежном лиственничном ВПК, 90% - в подтаежном сосновом ВПК;

процент лиственных в составе насаждений (P_{10}) - 100% в таежном лиственничном, лиственничном мерзлотном и подтаежном сосновом ВПК;

полнота насаждений (P_{11}) - 0,78 лиственничном мерзлотном ВПК;

возраст насаждений (P_{12}) - 96% в подгольцово-таежном ВПК;

проективное покрытие напочвенного покрова (P_{13}) - 94% в лиственничном мерзлотном ВПК.

Дисперсия менее всего отражена общностью в полноте насаждений (P_{11}) по каждому ВПК и по всему лесному поясу гор Южной Сибири в целом.

Интегральные характеристики (*Фактор 1* и *Фактор 2*) слабо объясняют дисперсию (общую и отдельных параметров) при расчете по всему лесному поясу в целом, что служит подтверждением целесообразности построения интегральных характеристик дисперсии по отдельным ВПК. При построении интегральной характеристики формирования поверхностного жидкого и твердого стока под пологом леса факторный анализ определяет их структуру, вклад общности и характерности в дисперсию процесса. Необъясненная общностью доля дисперсии относится на характерный фактор и погрешности измерений и вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев А.В. Гидрологическая роль горных лесов Сибири. -Новосибирск: Наука, 1982. - С. 182.
2. Краснощеков Ю.Н. Особенности функционирования и защитная роль лесов Монголии // География и природные ресурсы. - 2001. - №1. - С. 135-142.
3. Трубухин Н.А. Двумерная модель формирования дождевого паводка // Метеорология и гидрология. - 1983. - №7. - С. 93-100.
4. Ларионов Г.А. Методика средне- и мелкомасштабного картографирования эрозионноопасных земель // Актуальные вопросы эрозиоведения. - М.: Колос, 1984. - С. 41-66.
5. Митчел Дж.К., Бубензер Г.Д. Расчеты потерь почвы // Эрозия почвы.- М.: Колос, 1984. - С. 34-95.
6. Чеботарев Ю.А. Подход к динамико-стахостическому моделированию дождевого стока // Моделирование процессов гидросферы, атмосферы и ближнего космоса. - Новосибирск: Наука, 1985. - С. 94-101.
7. Жаркова Ю.Г. Почвозащитные свойства агроценозов // Работа водных потоков. - М.: МГУ, 1987. - С. 39-51.
8. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса.- М.: Изд-во АН СССР, 1971. - 144 с.
9. Молчанов А.А. Гидрологическая роль леса. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 460 с.
10. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. - М.: Высш. шк., 1973. - 399 с.
11. Швецс Г.И. Формирование водной эрозии, стока наносов и их оценка.- Л.: Гидрометеоиздат, 1974. - 182 с.
12. Назимова Д.И., Поликарпов Н.П., Сухинин А.И., и др. Использование спутниковой информации при анализе высотной поясности лесного покрова гор Южной Сибири // География и природные ресурсы. - 2000. -№4. - С. 117-123.
13. Назимова Д.И., Поликарпов Н.П., Сухинин А.И., Ускова Л.М., Федотова Е.В. Высотная поясность горных лесов и ее отражение на космических снимках NOAA/AVHRR // Лесоведение. - 2001. - №4. - С. 25-31.
14. Лоули Д.,Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод.- М.: Мир, 1967. - 144 с.
15. Аффифи А.,Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. -М.: Мир, 1989. - 488 с.