

**ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ  
ПРОЦЕССЫ**

УДК 624.131.544:551.311.2:627.141.1

**ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ОСАДКОВ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ, ЛАВИННЫХ  
И СЕЛЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОГОРЬЕ**

© 2007 г. Н. А. Казаков, Ю. В. Генсировский

Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института ДВО РАН

Поступила в редакцию 27.10.2005 г.

При расчете характеристик гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье суммы осадков и высоту снежного покрова необходимо рассчитывать с учетом их вертикальных градиентов. На о-ве Сахалин вертикальный градиент осадков за явление в среднем составляет 40–90 мм на 100 м превышения, достигая в случае прохождения тайфунов 500–600 мм на 100 м превышения.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования лавинных, селевых и гидрологических процессов на малых реках в низкогорье Южного Сахалина, проведенные нами в 1998–2005 гг., выявили проблемы, возникающие из-за того, что при расчете характеристик лавинных, селевых и гидрологических процессов и оценке воздействия на объекты и сооружения не учитывают особенности распределения осадков на горной территории.

Согласно нормативным документам в строительстве [5–12], при расчете характеристик паводков и половодий принимают данные ближайшей гидрометеорологической станции (ГМС), имеющей достаточный ряд наблюдений. Значения наблюдаемых осадков и рассчитанные значения их суточных максимумов 1, 5, 10% обеспеченностей, приведенные в справочнике “Ресурсы поверхностных вод СССР”, используют при расчетах характеристик гидрологических, лавинных и селевых процессов как обоснованные.

При этом не учитывается характер гидрометеорологических процессов на резко расчленен-

ной горной территории, расположенной на границе материк–океан, где режим осадков и динамика потоков в значительной мере определяется орграфическими факторами.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Несмотря на то, что рельеф Южного и Среднего Сахалина – низкогорье и абсолютные отметки водоразделов составляют 300–600 м, глубина расчленения рельефа достигает 500–700 м, что позволяет отнести его к классу альпинотипного рельефа.

Даже самые крупные горные реки территории имеют малую длину, большие уклоны русел и значительные средние высоты водосборов. В табл. 1 приведены характеристики бассейнов крупных рек Южного и Среднего Сахалина. Большинство же речных бассейнов территории имеет следующие характеристики: площадь бассейна – 1–15 км<sup>2</sup>, длина водотока – 3–10 км; средневзвешенный уклон – 60–80‰; максимальный уклон – до 100‰.

В силу указанных физико-географических особенностей территории Сахалина, разница

**Таблица 1.** Характеристики речных бассейнов, Южный и Средний Сахалин

Наименование реки	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Длина реки до гидрометрических створов, км	Средневзвешенный уклон, ‰	Средневзвешенный уклон водосбора, ‰	Средняя высота водосбора, м
Орловка	490	63	6.3	290	410
Буюклинка	171	45	13.0	340	540
Нижняя Матросовка	101	21	22.0	500	620
Леонидовка	451	53	14.0	450	590
Гастелловка	159	24	9.9	310	280
Нитуй	523	80	5.3	320	390
Макарова	580	95	5.2	320	420
Лазовая	303	41	7.2	230	260

**Таблица 2.** Абсолютная высота гидрометеорологических станций на Южном и Среднем Сахалине

Гидрометеорологическая станция	Абс. высота, м
Ноглики	29
Адо-Тымово	65
Тымовское	94
Онор	180
Первомайское	190
Поронайск	7
Макаров	38
Взморье	20
Стародубское	12
Долинск	42

между суммами осадков и высотой снежного покрова в днищах долин и приводораздельной части водосборов весьма велика.

На о-ве Сахалин все гидрометеорологические станции (ГМС), по данным которых проводятся расчеты характеристик гидрологических, лавинных и селевых процессов, расположены в долинах или на морском побережье в интервале абсолютных отметок от 20 до 190 м (табл. 2). Абсолютные отметки водоразделов составляют 300–500 м.

Например, при прохождении тайфунов “Оджин” и “Филлис” 2–7 августа 1981 г. сумма осадков на ГМС “Южно-Сахалинск” (абс. высота 22 м) составила 220 мм. За тот же период в Сусунайском хребте, по данным суммарных осадкомеров в интервале абс. отметок от 400 до 600 м, суммы осадков составили более 1000 мм при максимуме более 1200 мм (басейн р. Колка, абс. отметка 420 м, табл. 3).

Такая же картина характерна для распределения твердых осадков, на основе характеристик которых рассчитывается уровень весеннего половодья. Например, среднемноголетняя сумма твердых осадков за зимний сезон на ГМС “Тымовское” (абс. высота 94 м) составляет 172 мм, а на Чамгинском перевале Восточно-Сахалинских гор (абс. высота 800 м) – 777 мм.

Сумма осадков, выпавших во время снегопада 2–10.01.1991 г., составила на ГМС “Тымовское” 73.4 мм, а на Чамгинском перевале – 329.0 мм. При этом суточный максимум осадков (3.01.1991 г.) был равен на ГМС “Тымовское” – 23 мм, а на Чамгинском перевале – 127 мм.

Таким образом, значения осадков различной обеспеченности, рассчитанные по данным ГМС, значительно ниже реальных значений сумм осадков в горах.

Максимальные значения уровней и расходов воды дождевых паводков на реках Южного Сахалина, берущих начало в приводораздельной части Западно-Сахалинских гор и Сусунайского хребта, и уровней и расходов воды в половодье могут в несколько раз превышать расчетные значения.

Соответственно, значения максимальных уровней и расходов дождевых паводков и весеннего половодья, рассчитанные по существующим методикам [5–12], оказываются сильно заниженными по сравнению с наблюдаемыми максимальными.

Например, при расчете гидрологических характеристик рек юго-восточного побережья о-ва Сахалин (Макаровский р-н) принимается 1%-ный суточный максимум жидких осадков, равный 235 мм. Наблюденный суточный максимум осадков по ГМС “Макаров” составляет 230 мм. Рассчитанная по принятым методикам максимальная скорость течения р. Макарова составляет 3.0 м/с, тогда как по полевым оценкам достигает 5.0 м/с.

**Таблица 3.** Суммы осадков в разных высотных зонах Сусунайского хребта, выпавшие во время прохождения тайфунов “Оджин” и “Филлис” 2–7.08.1981 г. (данные суммарных осадкомеров)

Пункт наблюдения	Абс. высота зоны, м	Сумма осадков за явление, мм	Вертикальный градиент осадков, мм/100 м
ГМС “Южно-Сахалинск”, бассейн р. Сусуя	22	220	
Сусунайский хребет, пик Чехова, бассейн р. Рогатка:			
осадкомер № 27	220	133.4	56.3
осадкомер № 26	320	110.8	29.8
осадкомер № 29	580	341.9	57.3
Сусунайский хребет, Чеховский перевал, бассейн р. Рогатка, осадкомер № 20	470	149.0	28.3
Сусунайский хребет, бассейн р. Колка:			
осадкомер № 18	160	435	156
осадкомер № 17	420	1277	266
Мицкульский хребет (перевал), бассейн р. Владимировка, осадкомер № 37	530	200.2	351



**Рис. 1.** Южный Сахалин. V-образная долина малой реки. Фото Ю.В. Генсиоровского.

Такая же картина наблюдается при сравнении рассчитанных и реальных значений уровней и расходов воды половодья.

Мы полагаем, что в низкогорье и среднегорье различия между рассчитанными и реально наблюдаемыми значениями гидрологических характеристик вызваны, в первую очередь, недоучетом сумм осадков, реально выпадающих в водосборе и в несколько раз превышающих значения осадков, выпадающих в днищах долин.

При расчете гидрологических характеристик водотоков и характеристик селевых потоков в низкогорье и среднегорье необходимо учитывать и геоморфологические факторы гидрологических процессов.

Выше отмечалось (см. табл. 1), что большая часть водосборов бассейнов рек Южного Сахалина лежит в интервале абсолютных высот 350–1200 м при глубине расчленения рельефа 250–400 м. Крутизна склонов водосборов в верховьях достигает 35–50°.

Как следствие, при сильных осадках или бурном снеготаянии время добегания паводочной волны (а также, селевой волны) очень мало, вследствие чего на этих реках наблюдается резкий и значительный подъем уровней воды, что никоим образом не учитывается в методиках расчета гидрологических характеристик.

На малых водотоках, имеющих узкие V-образные долины (рис. 1), значительное превышение реальных уровней воды над расчетными вызывается также подпором воды из-за закорчевывания русла и перекрытия его оползнями, сходящими с бортов речных долин, и снежными лавинами, формирующими лавинные дабы в руслах рек.

В результате, размыв бортов долин происходит выше линии расчетного уровня (рис. 2), а при



**Рис. 2.** Река Кринка Правая. Уровни стояния воды во время прохождения паводков: 1 – 1% обеспеченности, рассчитанный через суточный максимум осадков по ГМС “Макаров”; 2 – 1% обеспеченности, рассчитанный с учетом вертикального градиента осадков; 3 – фактический. Фото Н.А. Казакова.

прорыве завалов резко увеличивается скорость течения воды, насыщение потока грунтовым и древесным материалом (карчами) и его эродирующая способность, что влечет за собой превышение реальных значений донной и боковой эрозии над расчетными.

Особенно сильное влияние на динамику русловых процессов карчеходы оказывают при паводках редкой повторяемости, когда происходит образование завалов и заломов протяженностью более 300 м.

Так, при прохождении тайфуна “Филлис” (1–7.08.1981 г.) карчеходы послужили одной из причин экстремального подъема уровня воды, повлекшего за собой затопление правой стороны долины р. Поронай, разрушение ряда населенных пунктов и многочисленные жертвы среди населения.

Указанные явления в сочетании с морфологией профиля речных долин служат причиной значительных смещений русел. Так, результаты анализа данных опросов местных жителей и неопубликованных материалов гидрологических исследований, выполненных в начале 1970-х годов, а также полевых исследований, проведенных авторами в 2003–2004 гг., позволяют утверждать, что русло р. Леонидовка в районе п. Леонидово за последние 30 лет сместилось к северо-востоку на 600–700 м от своего положения.

При проектно-изыскательских работах в расчетах, как правило, принимаются заниженные значения расчетных уровней стояния вод, объемов стока, скорости течения воды и, соответственно, дается заниженная оценка характеристик русловых деформаций.

Несоответствие рассчитанных гидрологических характеристик водотоков, снежных лавин и селевых потоков и их режима реально наблюдаемым при строительстве и проектировании объектов и сооружений приводит к принятию таких проектных решений, которые в дальнейшем могут послужить причиной аварий и катастроф.

При расчете характеристик снежных лавин и селевых потоков недоучет сумм осадков, выпавших в приводораздельной части лавиносборов и селевых бассейнов, приводит к занижению объемов лавин и селевых потоков и, как следствие, к сильному занижению их динамических характеристик: дальности выброса, скорости, высоты фронта лавины, высшего селевого горизонта, глубины селевой эрозии и силы давления на препятствие.

Значения селевых расходов 1% и 5% обеспеченности рекомендуется находить через расчеты расходов водных паводков 1% и 5% обеспеченности в селеносных водотоках. Такие расчеты в свою очередь выполняются на основе значений 1% и 5% обеспеченности осадков, выпадающих в селевом бассейне – без учета вертикального градиента осадков.

Однако обеспеченность расхода селевого потока далеко не всегда соответствует обеспеченности расхода водного потока. Так, объемы и расходы селей, сформировавшихся 5–6.08.1967 г. в селевых бассейнах Северного Кавказа и соответствовавших 1% обеспеченности, были вызваны водными расходами, соответствовавшими 20% обеспеченности [13]. Такие случаи неоднократно наблюдались и на Сахалине – в частности в Макаровском р-не [3, 4].

Следует отметить, что возникновению селя, как правило, предшествует период подготовки рыхлообломочного материала в селевых очагах, и паводок, вызвавший формирование селевого потока, по своим параметрам может быть меньше паводка, равного по обеспеченности данному селевому потоку.

По этой причине расчет обеспеченности селевого паводка не в полной мере применим даже для расчета характеристик и режима селевых потоков в тех районах высокогорья и среднегорья, в которых потенциальные селевые массивы представлены моренами, а механизм зарождения селя – эрозионный.

В низкогорье о-ва Сахалин, где преобладает обвально-оползневой (сдвиговый) механизм зарождения селей, прямая зависимость между характеристиками гидрометеорологического режима территории и характеристиками селевых процессов отсутствует [3].

Мы полагаем, что несоответствие селевых расходов рассчитанным значениям водных расходов соответствующей обеспеченности в значительной степени вызвано недоучетом сумм осадков, выпадающих в селевом бассейне – вслед-

ствие того, что вертикальный градиент осадков не используется в расчетах.

Следует отметить, что в результате недоучета сумм осадков появляются ошибки в прогнозе паводков, снежных лавин и селевых потоков, приводящие к серьезным экономическим ущербам и жертвам среди населения. Например, в сентябре 1992 г. сильные осадки, выпавшие в водораздельной части Западно-Сахалинских гор, привели к внезапным паводкам и селевым потокам в приустьевых частях рек на Восточном и Западном побережьях Южного Сахалина. Тогда как прибрежные гидрометеорологические станции в этот период зарегистрировали малое количество осадков.

## ПУТИ РЕШЕНИЯ

По указанным причинам при расчете максимальных сумм жидких и твердых осадков и высоты снежного покрова в горах необходимо использовать значения вертикальных градиентов осадков, рассчитанные на основе анализа материальных наблюдений за осадками и снежным покровом либо на основе общих закономерностей распределения осадков и снежного покрова в различных природных комплексах [1–3].

Расчет характеристик гидрологических, лавинных и селевых процессов необходимо проводить с учетом вертикального градиента осадков и высоты снежного покрова.

Сумму осадков, выпадающих в бассейне реки, можно определить как средневзвешенное значение сумм осадков, рассчитанных для каждой высотной зоны в бассейне реки:

$$X = \int_n \left( x + (F \cdot H_n) \frac{\Delta S_n}{S} \right),$$

где  $X$ ,  $x$  – суммы осадков, выпавших в бассейне реки и на ближайшей гидрометеорологической станции соответственно, мм;  $F$  – вертикальный градиент осадков в исследуемом районе, мм на 100 м превышения;  $H_n$  – высотный интервал зоны, м абс.;  $S$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $\Delta S_n$  – площадь водосбора, лежащая в высотном интервале  $H_n$ , км<sup>2</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе данных наблюдений за осадками и снежным покровом в горах о-ва Сахалин, проводившихся в 1970–2004 гг., нами рассчитаны значения вертикальных градиентов осадков для горных районов Южного и Центрального Сахалина.

В разных районах острова средние значения вертикального градиента суммы жидких осадков за явление составляют 40–70 мм на 100 м превышения (мм/100 м), твердых – 25–90 мм/100м. Максимальное значение вертикального градиента



**Рис. 3.** Селевые отложения в долине р. Пулька, мощность селевых отложений в долине достигает 10 м. Фото В.И. Окопного.



**Рис. 4.** Гора Макарова, абс. отметка – 760 м. Лавино-сборные и селевые бассейны в верховьях р. Пулька. 25 мая 2005 г. Фото Ю.В. Генсировского.

суммы как жидких, так и твердых осадков за явление на Сахалине превышает 100 мм/100 м.

Такой же характер изменения характеристик с высотой наблюдается и в распределении снежного покрова. Так, среднее значение вертикального градиента прироста высоты снежного покрова за явление составляет на Южном Сахалине 35 мм/100 м. Среднее значение вертикального градиента годовой суммы твердых осадков составляет 70 мм/100 м.

В качестве примера приведем расчет максимальной суммы жидких осадков за явление для бассейна р. Пулька (левый приток р. Макарова). В бассейне формируются селевые потоки объемом более 350000 м<sup>3</sup>.

Река Пулька берет свое начало на восточных склонах г. Макарова (рис. 3, 4) на высоте 600 м и впадает в р. Макарова. Длина реки составляет 5,6 км,

площадь водосбора – 6,7 км<sup>2</sup>, общее падение реки – 580 м. ГМС “Макаров” расположена в 7 км от устья р. Пулька на абсолютных отметках 38 м.

Для расчета максимальных расходов воды по формуле предельной интенсивности стока (на реках с площадью водосбора менее 100 км<sup>2</sup>) необходимо знать величину максимальных суточных осадков 1% обеспеченности. В исследуемом районе, согласно [6], принимается значение 235 мм. Эта величина рассчитана на основании данных ГМС “Макаров”, высотная отметка которой приведена выше и должна использоваться при расчете гидрологических процессов и гидрологической составляющей селевых процессов согласно нормативным документам [7, 10, 13]. Наблюденный суточный максимум осадков по ГМС “Макаров” составляет 230 мм.

**Таблица 4.** Расчет максимальной суточной суммы осадков по бассейну р. Пульки с учетом вертикального градиента осадков

Абс. высота зоны $H$ , м	Площадь бассейна в высотной зоне $\Delta S$ , км <sup>2</sup>	Площадь бассейна $S$ , км <sup>2</sup>	$\Delta S/S$	Вертикальный градиент осадков $\Delta x$ , мм/100 м	Суточная сумма осадков (1%) на ГМС “Макаров” $x$ , мм	Абсолютная высота ГМС “Макаров”, м	Суточная сумма осадков (1%) в высотной зоне $x'$ , мм	Средневзвешенная максимальная суточная сумма осадков по бассейну $x'$ , мм
0–100	0	5	0.00	0	235	38	0	451
100–200	0.64	То же	0.13	60			45	
200–300	1.8	»	0.36	Тот же			149	
300–400	1.8	»	0.36	»			171	
400–500	0.5	»	0.10	»			54	
500–600	0.2	»	0.04	»			24	
600–700	0.05	»	0.01	»			7	
700–800	0.01	»	0.00	»			1	

По проведенным расчетам с учетом вертикального градиента осадков максимальные значения суточных осадков 1% обеспеченности можно представить как средневзвешенную сумму осадков, рассчитанных для каждой высотной зоны в бассейне реки. Полученный результат составил 451 мм (табл. 4). Расчетные данные были введены в формулу предельной интенсивности стока.

Значение максимального расхода воды 1% обеспеченности, рассчитанное по формуле предельной интенсивности стока [5–6] на основе данных ГМС “Макаров”, составляет 49.50 м<sup>3</sup>/с, а рассчитанное по той же формуле с учетом вертикального градиента осадков – 86.95 м<sup>3</sup>/с. Последнее значение подтверждается результатами натурных наблюдений.

## ВЫВОДЫ

1. Для расчета характеристик гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье и среднегорье суммы жидких и твердых осадков и высоту снежного покрова необходимо рассчитывать с учетом их вертикальных градиентов.

2. В Южных и Центральных районах о-ва Сахалин средние значения вертикального градиента суммы жидких осадков за явление составляют в среднем 40–70 мм/100 м, твердых – 25–90 мм/100 м.

3. Максимальное значение вертикального градиента суммы как жидких, так и твердых осадков за явление редкой повторяемости превышает 100 мм/100 м.

4. Среднее значение вертикального градиента прироста высоты снежного покрова за явление составляет 35 мм/100 м.

5. При расчетах максимальных уровней надо учитывать возможность образования в горах плотин из-за схода лавин, оползней, селей, завалов деревьев. При прорыве таких плотин возникает паводочная волна, за счет чего могут наблюдаться величины модулей максимального стока редкой повторяемости в 3–6 раз больше, чем действительно сформированные от интенсивного снеготаяния в горах или интенсивных осадков.

6. При моделировании русловых процессов бассейны малых водотоков должны рассматриваться как природные селевые комплексы, так как верховья большинства малых водотоков селеносны, а селевые процессы оказывают определяющее влияние на характеристики русловых процессов.

7. При расчете характеристик дождевых паводков, формирующихся в малых водотоках о-ва Сахалин (как селеносных, так и неселеносных), необходимо учитывать мутность потоков. Значительные уклоны водосборов и русел, состав пород и высокая интенсивность выпадения осадков приводят к сильному насыщению потоков твердой фракцией. В результате, плотность паводковых потоков зачастую приближается к плотности

наносоводных потоков, составляя по предварительным оценкам 1100–1200 кг/м<sup>3</sup>. При этом резко возрастает их эродирующая способность. Расчет характеристик таких потоков методами, принятыми в гидрологии, не репрезентативен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Древилло М.С. Геоэкологические исследования снежного покрова на основе его ландшафтно-индикационных свойств (на примере о. Сахалин): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Барнаул: Парграф, 2001. 27 с.
2. Древилло М.С., Жируев С.П., Окопный В.И., Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Мониторинг снежного покрова о. Сахалин // Матер. гляциологических исследований. Вып. 89. М.: ИГ РАН, 2000. С. 89–94.
3. Казаков Н.А. Геологические и ландшафтные критерии оценки лавинной и селевой опасности при строительстве линейных сооружений (на примере о. Сахалин): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2000. 38 с.
4. Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В. Вертикальный градиент осадков и расчет характеристик гидрологических, лавинных и селевых процессов в низкогорье // Матер. второй междунар. конф. “Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов”. Иркутск: Изд. ИГ СО РАН, 2005. С. 233–235.
5. Казаков Н.А., Окопный В.И., Жируев С.П., Генсиоровский Ю.В., Аникин В.А. Лавинный режим Восточно-Сахалинских гор // Матер. гляциологических исследований. Вып. 87. М.: ИГ РАН, 1999. С. 211–215.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 4. Сахалин и Курилы. Л.: Гидрометиздат, 1973. 263 с.
7. СНиП 2.05.06–85\*. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000.
8. СНиП 2.01.15–90. Инженерная защита зданий, территорий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1998.
9. СНиП 22–01–95. Геофизика опасных природных воздействий. М.: Минстрой России, ГП ЦПП, 1996.
10. СНиП 11–02–96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Минстрой России, ГУП ЦПП, 1997.
11. СП 11–103–97. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. М.: Госстрой России, АО ВНИИСТ, 1997.
12. СП 33–101–2003. Определение основных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.
13. СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. М.: Минстрой России, ГП ЦПП, 1997.
14. Флейшман С.М. Сели. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 312 с.