

УДК 551.435.1:551.432.7 → 556.535.6 (571.66)

© 2017 г. С.Р. ЧАЛОВ, А.С. ЦЫПЛЕНКОВ

СТОК НАНОСОВ МАЛЫХ РЕК РАЙОНОВ СОВРЕМЕННОГО ВУЛКАНИЗМА (р. Сухая Елизовская, Камчатка)

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Россия
e-mail: srchalov@geogr.msu.ru*

Исследуются сезонные особенности формирования стока наносов малой реки Сухая Елизовская, протекающей на склонах действующих вулканов Авачинский и Корякский (Камчатский край). На основе обобщения полевых наблюдений и эрозионного моделирования MUSLE приводятся сведения о внутрисуточных (с интервалом 5–10 минут) и сезонных колебаниях стока воды и наносов в разных геолого-геоморфологических условиях, характерных для бассейна. В пределах верхних звеньев речной сети – на склонах вулканов и предгорных территорий средней крутизны – сток наносов характеризуется 10-кратными суточными колебаниями и относительно невелик (менее 0.1 т/км² сут). В пределах лахаровых долин наблюдаются максимальные значения стока наносов (в изученные периоды времени – более 10 т/км² сут), определяющие более 90% выноса твердого материала за пределы бассейна р. Сухая Елизовская. В этих водотоках отмечаются 100-кратные изменения мутности воды и исключительно высокие темпы перетолжения материала в пределах речной долины (в изученные периоды времени – до 11.3 т/сут).

Ключевые слова: сток наносов, вулканические территории, лахаровые долины, Камчатка.

Введение

На склонах активных вулканов формируются особый тип рек. Водозадерживающая роль снежников, водопроницаемость рыхлых вулканогенных пород, неравномерный характер питания рек в условиях сезонного и суточного ритма таяния снежников и интенсивное таяние льда и снега во время извержений вулканов – причины эпизодичности их водного стока. Особую роль в формировании неравномерности стока играют лахаровые отложения, которые на многих реках определяют распространение специфического морфодинамического типа русла лахаровых долин [1]. Большую часть года многие реки Камчатки лишены воды – отсюда их местное название “сухие реки” [2].

Последние работы по стоку наносов рек Камчатки [3] были основаны на данных сетевых наблюдений. Отсутствие гидрометрических постов в пределах вулканических территорий исключало возможность оценки влияния местных условий на режим стока наносов. В данной статье на примере малой реки Сухая Елизовская, формирующейся на склонах действующих вулканов Авачинский и Корякский, обобщены результаты полевых наблюдений и бассейнового моделирования стока наносов для выявления его сезонных и суточных характеристик. Проведена оценка суточных и месячных значений стока наносов, зависящих от изменчивости положения снежного покрова, характера выпадения дождевых осадков и локальных особенностей водосборов. Рассматриваются возможности применения алгоритмов модифицированного уравнения универсальной эрозии MUSLE для расчета стока наносов в различных геолого-геоморфологических условиях бассейнов малых рек вулканических территорий.

Характеристика исследуемой территории

Река Сухая Елизовская — одна из многочисленных рек лахаровых долин Камчатского полуострова (рис. 1А). Речная система сформировалась вокруг тела вулканического сея (лахара), сошедшего с Авачинского вулкана и образовавшего плоский конус выноса в виде наклонного пролювиального шлейфа (т.н. лахаровую долину). Выполяживание продольного профиля здесь настолько резко (на протяжении 3–5 км уклон реки уменьшается в 3–4 раза, от 60–70 до 15–20‰), что водный поток аккумулирует наносы и теряет способность формировать русло, растекаясь по собственному конусу выноса и часто теряясь в рыхлых отложениях. В периоды повышенного стока Сухая Елизовская впадает в реку 1-ая Мутная, которая, в свою очередь, служит временным притоком р. Авача (рис. 1Б). Длина р. Сухая Елизовская 20 км, площадь ее водосборного бассейна 173.6 км² (рис. 1В). В нее впадают 6 постоянных притоков и еще несколько временных.

Бассейн реки располагается на склонах вулканов Авачинский, молодой конус которого имеет голоценовый возраст, и Корякский. Эта территория относится к юго-восточной почвенной провинции (зона каменных березняков), где преобладают вулканические слоисто-охристые дерновые почвы. Поверхностный органогенный горизонт в пределах провинции сформирован на пепле вулкана Авачинская сопка (извержение 1926 г).

Району исследований присущи большие суточные и сезонные амплитуды колебаний температур. Зимний период характеризуется низкими температурами и большим количеством снега. Среднегодовая температура воздуха +1.9 °С. Самый теплый месяц — август, со среднесуточной температурой +15.3 °С, самый холодный — январь (–10.5 °С). Абсолютный максимум температуры +31.5 °С был зарегистрирован в авгу-

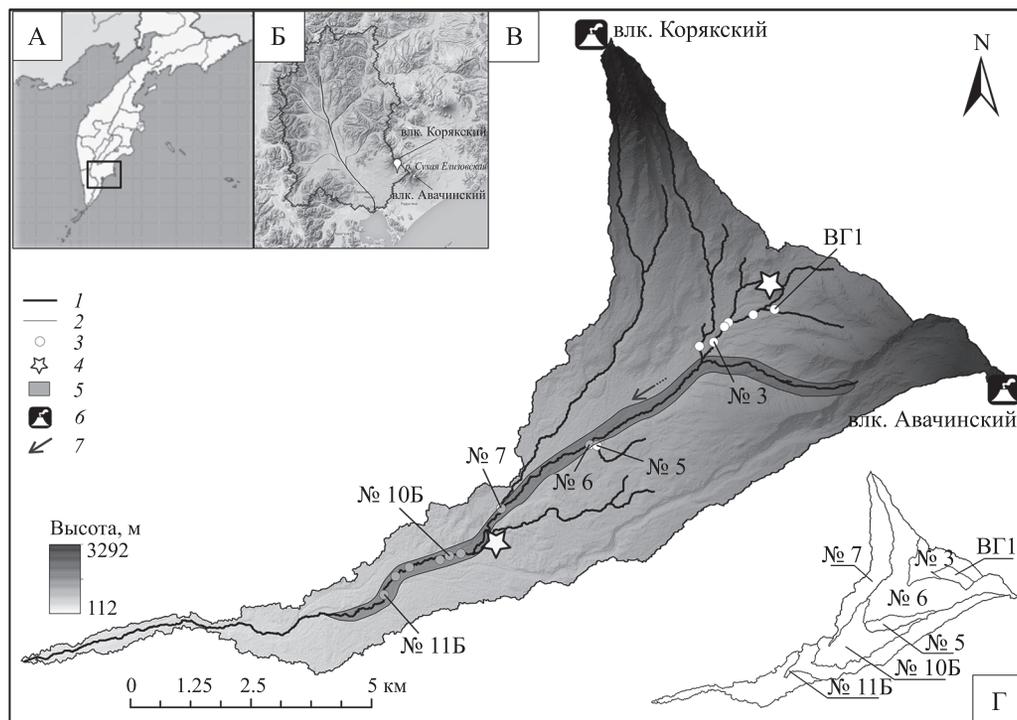


Рис. 1. Обзорная картосхема бассейна р. Сухая Елизовская

А, Б — положение бассейна; В — орогидрографическая схема бассейна с указанием створов экспедиционных работ (ВГ1, № 3 ... № 11Б); Г — схема деления бассейна на частные водосборы: 1 — гидрографическая сеть, 2 — частные водосборы, 3 — временные гидрометрические посты и их номера, 4 — полевые метеостанции, 5 — лахаровая долина, 6 — вулканы, 7 — направление течения

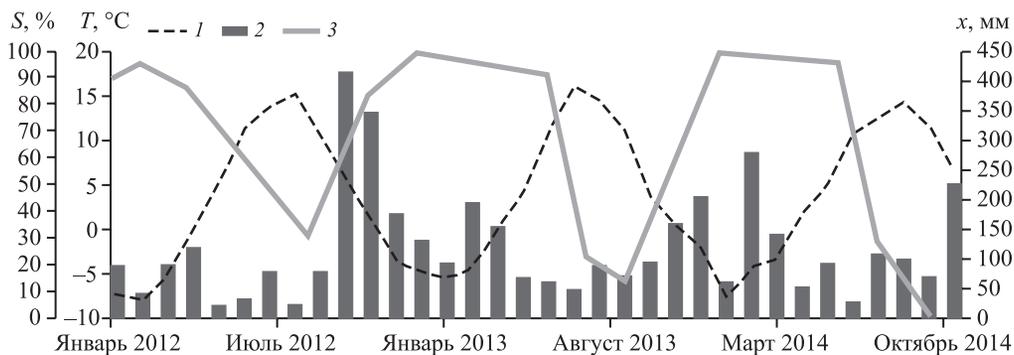


Рис. 2. Временная изменчивость основных метеорологических показателей и доли занятости снежным покровом бассейна р. Сухая Елизовская
 1 – среднемесячная температура T , °C, 2 – среднемесячная сумма осадков x (мм), 3 – площадь снежного покрова S , % от площади бассейна

сте 2012 г., минимум (-31.7 °C) в феврале 1917 г. (для г. Елизово). Следует отметить, что за последние десять лет (2005–2015 гг.) температура летних месяцев существенно подросла, достигнув $+10.3$, $+13.2$, $+14.4$ и $+11.0$ °C в июне, июле, августе и сентябре соответственно.

Средний годовой слой осадков 986 мм. Основное количество осадков выпадает в осенние и зимние месяцы, при этом сезонная вариабельность их выпадения исключительно высокая. Рекордный максимум осадков в жидкой и твердой форме за сутки – 182 мм – зарегистрирован в ноябре 1995 г., абсолютный максимум за месяц – 346 мм – в декабре 2010. Чрезвычайно обильным на осадки выдался октябрь 2012 г. – 304 мм (рис. 2). Данные метеостанции г. Елизово репрезентативны для бассейна, о чем свидетельствует хорошая корреляция ($R^2 = 0.6$) хода осадка на метеопостах в бассейне Сухой Елизовской, измеряемой в течение полевых сезонов 2012–2014 гг. портативной метеостанцией *Davis Vantage Pro II*.

Высока вариабельность положения снежного покрова. На основе нормализованного индекса снега (NDSI), по данным снимков спутника Landsat 7 ETM+ (разрешение 30 м), показано (рис. 2), что большую часть года (ноябрь–май) не менее 90% территории скрыто под снегом. Это определяет относительно короткий период существования поверхностного стока (с июня по сентябрь).

В пределах водосбора р. Сухая Елизовская выделяются три типа водосборов, отличающихся по условиям формирования и стока наносов [1]:

I – водосборы на крутых склонах вулкана с открытой и легко размываемой поверхностью, русла рек сложены преимущественно крупнообломочным материалом;

II – водосборы лахаровых долин, сложенных преимущественно туфовыми конгломератами и конглобрекциями. Русла лахаровых долин формируются в толще легкоразмываемых отложений, что определяет их распластанность (блуждание) и образование многоуровневости;

III – водосборы в пределах предгорных территорий средней крутизны, где старые вулканические отложения покрыты кустарничковой растительностью, а речные долины отличаются обилием крупнообломочного материала.

Материалы и методы

Материалы, использованные в работе, собраны в экспедициях 2007, 2010 и 2012–2014 гг. Эти периоды различались по водности: 2007 и 2010 гг. были годами повышенной водности, 2012, 2014 гг. – средней, а 2013 г. был маловодным. В 2012 и 2014 гг. измерения проводились преимущественно в верхней части водосбора, в 2013 г. – в нижней и средней частях (рис. 1). Большинство анализируемых в работе створов (№ 6, 10б, 11б)

расположены в пределах долин лахаровых потоков и характеризуют II тип водосборов. Ширина русла составляла 10 м, при этом число рукавов в поперечном сечении за счет распластывания потока в толще собственных отложений достигало 15. В пределах рек водосборов III типа формируются разновидности горных русел (в основном порожи-сто-водопадные), сложенных крупнообломочным материалом (притоков р. Сухой Елиза-вской, створы № 5, 7). Русла расположены в V-образных долинах, их ширина не пре-вышала 2 м. Непосредственно на склонах вулканов в водосборах I типа формируются порожи-сто-водопад-ные русла в узких (менее 10 м) V-образных долинах с уклонами русла более 50‰ (створы № 3, ВГ1).

Сток наносов на исследуемой реке оценивался стандартными методами. Изме-рения скоростей производились при помощи гидрометрической вертушки ИСП-1 на одной вертикали, в точке с максимальной глубиной на расстоянии от поверхности воды, равной $0.5h$. При глубинах менее 0.05 м измерения скоростей проводили по-верхностными поплавками. Содержание твердых частиц в потоке определялось весо-вым и оптическим способами. Для измерения срочной мутности потока применялся портативный оптический мутномер НАСН 2100Р. Для перевода из оптических единиц измерения мутности (NTU) в весовые ($г/м^3$) использовались региональные зависи-мости [4].

Полевые данные использовались для верификации моделей оценки среднегодовых темпов эрозии почв на основе Универсального Уравнения Потерь Почвы (USLE). [5]. Учет сезонных особенностей проводился согласно модифицированному универсально-му уравнению эрозии почв (MUSLE) [6]:

$$Y = 11.8 (h Q_{max})^{0.56} K L S C P, \quad (1)$$

где Y – смыв почвы с единицы площади в т/га в год; h – слой стока за отдельное ги-дрологическое событие, мм; Q_{max} – максимальный расход воды за гидрологическое со-бытие, $м^3/с$; K – фактор эродируемости (смываемости) почвы, численно равный мо-дулю смыва с площадки длиной 22.1 м и уклоном 9%, содержащейся по бессменному пару и отнесенный к величине эрозионного потенциала осадков (T час $МДж^{-1} мм^{-1}$); L – фактор длины склонов – отношение смыва со склона некоторой длины к смы-ву со склона длиной 22.1 м при прочих равных условиях (безразмерный); S – фактор уклона – отношение смыва со склона некоторой крутизны к смыву со склона укло-ном 9% при прочих равных условиях (безразмерный); C – индекс, отражающий влия-ние землепользования, который зависит от растительного покрова (безразмерный); P – фактор эффективности противоэрозионных мер, представляющий собой от-ношение смыва с поля, на котором применяются противоэрозионные меры к смы-ву с поля, на котором противоэрозионные меры не применяются, а обработка почвы и посев ведутся вдоль склона (безразмерный). Использование стокового фактора вме-сто эрозионного потенциала осадков (R) повышает точность оценки почвенной эрозии по сравнению с USLE и RUSLE [7]. В качестве входной информации использовалась ЦМР “ALOS WORLD3D” с разрешением 5 м, спутниковые снимки Landsat 7 ETM+ на 24.07.2012 и 15.06.2013 и спутниковые снимки Landsat 8 на 20.06.2014 (для определения C-фактора).

Расчет слоя стока производился по формуле:

$$h = Q_{cp} \cdot \Delta t / F \cdot 1000, \quad (2)$$

где h – слой стока с водосбора площадью F , мм; Q_{cp} – средний расход воды за период времени Δt , $м^3/с$; Δt – период времени, с; F – площадь водосбора, $км^2$. Значения эроди-руемости почвы (фактор K) определялось по зависимости от текстурного класса почвы и содержания органики [8]. В расчете параметра LS использовалась зависимость Е. Ми-тасовой [9]:

$$LS[\text{безразмерный}] = (m + 1) \left[\frac{Ac}{22.1} \right]^m \left[\frac{\sin \beta}{5.16} \right]^m, \quad (3)$$

где A_c – площадь области поступления материала в верховьях склона, отнесенная на единицу ширины, м; β – уклон склона в градусах; m (0.6) и n (1) – эмпирические параметры, зависящие от превалирующего типа потока. 22.1 и 5.16 м – масштабные коэффициенты.

Для оценки фактора C использовалась его зависимость от индекса NDVI [10]:

$$C = \exp\left(-2 \frac{NDVI}{1 - NDVI}\right), \quad (4)$$

где $NDVI$ – нормализованный индекс растительности, расчет которого производился по спутниковым снимкам Landsat 7+ ETM (24.07.2012 и 15.06.2013) и по спутниковым снимкам Landsat 8. Значение фактора P для исследуемого бассейна было принято равным 1 (отсутствие хозяйственной деятельности).

Для учета аккумуляции материала в нижних частях склонов учитывался коэффициент доставки наносов:

$$E_i = \sum_i musle_i SDR, \quad (5)$$

где E – сток наносов с частного водосбора, т/год; $usle_i$ – результирующая величина уравнения MUSLE, т.е. смыв почвы с единицы площади в год в т/га в год. Расчет коэффициента доставки наносов основан на учете цифровой модели рельефа [11] для каждой i -й ячейки:

$$SDR_i = \frac{SDR_{\max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC_i}{k}\right)}, \quad (6)$$

где SDR_{\max} – теоретический максимум коэффициента доставки наносов, равный 0.8; IC_0 и k – эмпирические коэффициенты для горных территорий, принимаемые равными 0.5 и 2 [12]; IC_i – индекс связанности верховьев и низовьев склона, рассчитываемый для водосбора каждого элемента гидрографической сети:

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right), \quad (7)$$

где D_{up} – параметр, характеризующий потенциально возможное количество наносов, которые могут переноситься из зоны эрозии в зону транспорта на склоне; D_{dn} – взвешенная длина зоны транспорта на склоне, включает в себя все факторы, которые могут влиять на задержание элементарной частицы или наоборот [11]. Эти составляющие уравнения зависят от среднего уклона склона, площади верхней части рассматриваемого частного водосбора и значения фактора C

$$D_{up} = \bar{C} \bar{S} \sqrt{A}, \quad (8)$$

где C – среднее значение фактора C из уравнения USLE для верхней части водосбора; S – средний уклон верхней части склона (м/м); A – площадь (м²).

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{C_i S_i}, \quad (9)$$

где d_i – длина тальвега потока внутри каждой i -й ячейки раstra, м; C_i и S_i – значение фактора растительного покрова “ C ” и уклон склона для каждой i ячейки.

Результаты и обсуждение

Основная характеристика стока в пределах бассейна – его пространственно-временная изменчивость. Величина колебаний стока зависит от объема притока от снежников. Дождевые осадки в условиях доминирующей роли снеготаяния и высоких

темпов фильтрации не оказывают заметного влияния на сток воды в пределах лахаровой долины (табл. 1). Изменение границы снежного покрова, по мере его отступления летом, определяет формирование стока, гидрограф которого трансформируется ниже по течению за счет фильтрации в толщу лахаровых отложений (рис. 3). Попадая в пределы лахаровой долины, вода активно фильтруется и постепенно заполняет подрусловые пути. Последнее снижает фильтрацию и, таким образом, поверхностный сток увеличивается. Освобождение подземных горизонтов вызывает очередное усиление фильтрации, служа причиной усиления цикличности стока (с интервалом пульсаций 5–10 минут). Кратковременные изменения стока воды и наносов (в пределах часов и минут) (рис. 3Б) присущи участкам рек в пределах лахаровых долин и обусловлены активным взаимодействием руслового и подруслового потоков. В среднем от 70 до 100% суммарного водного стока фильтруется в подрусловые горизонты. В период наблюдений расход в створах, расположенных непосредственно в пределах лахаровой долины (№ 6, 106, 116), отсутствовал или был исключительно низким ($0.01 \text{ м}^3/\text{с}$), что соответствует слою поверхностного стока в 3 мм. Наибольшие расходы, зарегистрированные в июле – августе, превышали $0.5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Неравномерность водного стока определяет транспорт наносов. Материал, поступающий в русла с горных склонов, переносится речными потоками в периоды наличия стока; в разные сезоны зоны эрозии и аккумуляции смещаются вверх или вниз по долине. Потери стока на инфильтрацию определяют сортировку донных отложений в пределах бассейна: глыбы диаметром 1.5 м перерабатываются в верхней и средней части транзитной зоны (водосборы I и III), в лахаровых долинах преобладает более мелкий обломочный материал, гравий, песок, пепел. Такому распределению аллювия способствуют также высокая пористость пирогенных обломков и их быстрое истирание и дробление в процессе переноса речными потоками.

Протекая по лахаровым отложениям, в условиях высоких уклонов долин (в пределах 25–60%), поток быстро насыщается пирокластическим материалом до первых процентов объема и становится гиперконцентрированным (мутность в весовом эквиваленте может составлять 10^4 мг/л и более). Увеличение расходов воды приводит к “селеподобному” движению материала (формированию лахаров). Содержание взвешенных и влекомых наносов в потоке возрастает до такой степени, что он продолжает движение только под действием силы тяжести и поведение потока определяется в основном фрикционными взаимодействиями между частицами. Из-за легкости материала в составе взвеси переносятся песок и даже галька. По наблюдениям на створах 6, 10, 11 при расходе воды $0.1 \text{ м}^3/\text{с}$ размеры перемещаемых потоком частиц достигают 5 см (средняя галька).

Таблица 1

**Гидроклиматическая характеристика модельных подбассейнов
р. Сухая Елизовская с 2012 по 2014 г.**

Номер створа	Площадь частного водосбора, км ²	Количество осадков, мм			Слой стока, мм			Максимальный расход воды, м ³ /с		
		период наблюдений								
		август 2012 г.	июнь 2013 г.	июнь 2014 г.	август 2012 г.	июнь 2013 г.	июнь 2014 г.	август 2012 г.	июнь 2013 г.	июнь 2014 г.
ВГ1	1.26	–	–	13.5	200	10.1	278.0	1.0	0.1	1.2
3	6.16	18	–	–	57.1	0	0	0.92	0	0
5	1.94	18	–	–	23.2	20.0	18.7	0.15	0.12	0.11
6	25.2	18	6.2	–	1.49	0.53	0	0.10	0.01	0
7	8.33	18	–	–	12.6	0	0	0.27	0	0
106	41.5	–	6.2	–	0	0.02	0	0	0.004	0
116	49.7	–	6.2	–	0	0.04	0	0	0.02	0

А

2012 год

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$

1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

— $Q, \text{ м}^3/\text{с}$
- - - $S, \text{ г}/\text{м}^3$

$S, \text{ г}/\text{м}^3$

5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0

3 створ

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$

$S, \text{ г}/\text{м}^3$

0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0

— $Q, \text{ м}^3/\text{с}$
- - - $S, \text{ г}/\text{м}^3$

90000
80000
70000
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0

6 створ

июл 12
авг 12

30
1
2
3
4
5
6

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$

— $Q, \text{ м}^3/\text{с}$
- - - $S, \text{ г}/\text{м}^3$

$S, \text{ г}/\text{м}^3$

70
60
50
40
30
20
10
0

5 створ

июл 12
авг 12

29
30
31
1
2
3
4
5
6

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$

— $Q, \text{ м}^3/\text{с}$
- - - $S, \text{ г}/\text{м}^3$

$S, \text{ г}/\text{м}^3$

90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

7 створ

июл 12
авг 12

28
29
30
31
1
2
3
4

Внутричасовые пульсации 31 июля 2012 г.

— створ 3
- - - створ 6

$H, \text{ см отп}$

30
25
20
15
10
5
0

июл 12
авг 12

16:14
16:21
16:29
16:36
16:43
16:50
16:57

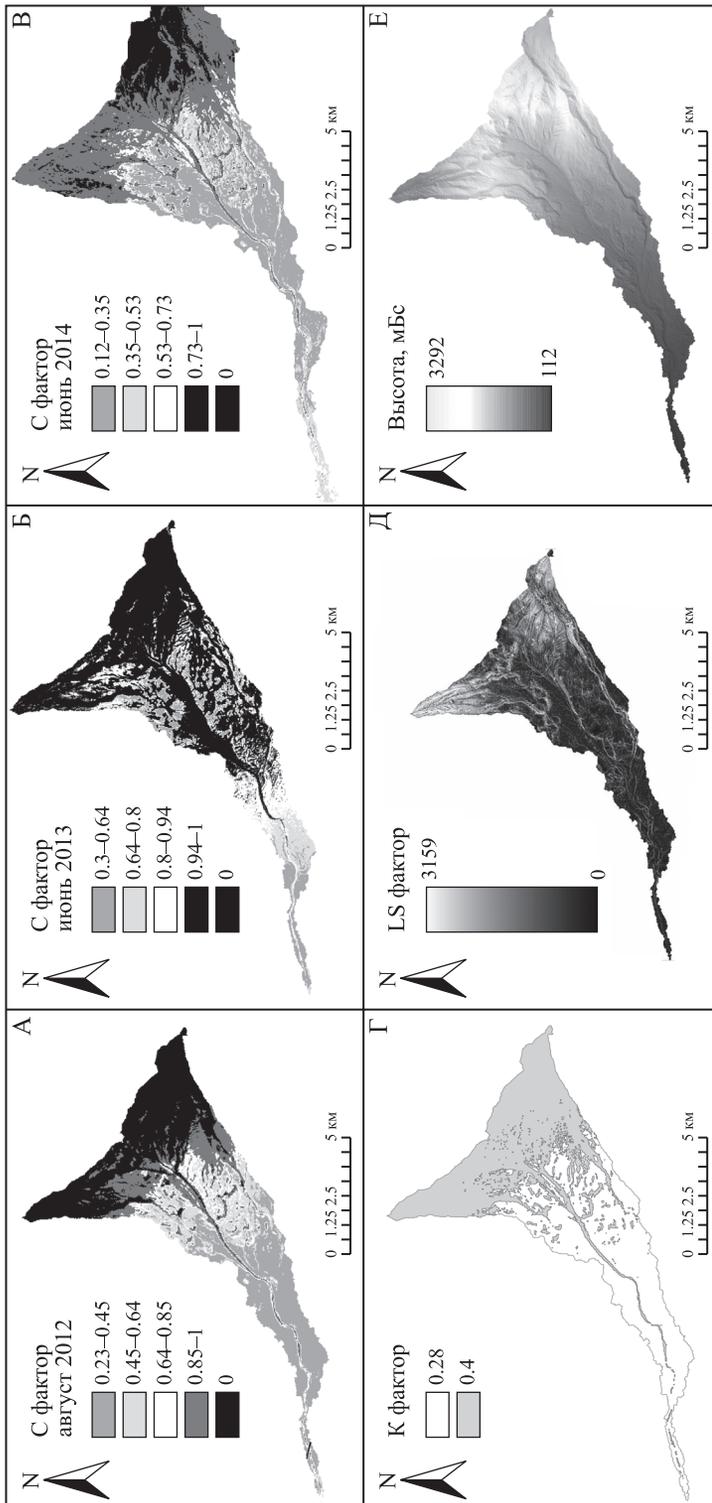


Рис. 4. Расчетные параметры модели MUSLE
 Значение факторов: А – С 24.07.2012 (безразмерный), Б – С 15.06.2013 (безразмерный), В – С 20.06.2014(безразмерный), Г – К (Т час МДж⁻¹ мм⁻¹), Д – LS (безразмерный); Е – цифровая модель рельефа Балтийской системы, м

По мере продвижения от истока реки к устью и, следовательно, уменьшения водности реки, однозначные типы связи (имеющие линейную зависимость) переходят к сложным (петлеобразным). Это объясняется наибольшей однородностью формирования стока воды и наносов в верхних частях бассейна (водосборы I). Здесь основным источником наносов служит русло, в то время как в нижнем течении водосбора (в пределах лахаровой долины, водосборы II) преобладающим, но не исключительным является размыв лахаровых отложений. При этом на состав наносов влияние оказывают боковые притоки (водосборы III), отличающиеся по составу материала.

Расчет по модифицированному уравнению эрозии почв MUSLE (1) производился для 7 створов (см. рис. 1 и табл. 1) и для трех временных отрезков: август 2012, июнь 2013, июнь 2014 (табл. 1). Пространственная изменчивость этих параметров представлена на рис. 4. Значение параметра C растет от низовьев к верховьям водосбора, достигая 1, что отражает уменьшение густоты растительного покрова вплоть до исчезновения древесной и кустарниковой растительности. Областям, занятым снежным покровом, придавалось значение коэффициента C , равное 0 (рис. 4). По эрозионной устойчивости почв (параметр K) в пределах бассейна выделены две зоны – участков распространения вулканических почв ($K = 0.4$ Т час МДж⁻¹ мм⁻¹) и прочих районов ($K = 0.2$ Т час МДж⁻¹ мм⁻¹).

Максимальные значения стока наносов зафиксированы в 2012 г. в верхней части водосбора на створе 3 (в среднем 60 т/день). Ниже по течению сток воды и наносов быстро снижался и полностью отсутствовал ниже створа 6. Такое распределение значений стока наносов соответствует условиям освождения водосбора от снега. В июне 2013 и 2014 гг. постоянный сток наносов наблюдался в створах № 106 и 116, расположенных непосредственно ниже отступающей толщи снежного покрова, покрывающей большую часть бассейна. В этот период времени максимальных значений сток наносов достигает в верхних звеньях речной сети, где постоянный поток наблюдается на относительно коротких участках русла. Ниже по течению он теряется в лахаровых отложениях под снежной толщей.

В обеих гидроклиматических ситуациях (июнь и конец июля–август) сходимость результатов моделирования MUSLE (табл. 2) и данных, полученных при полевых работах, высока (относительная ошибка 9.7%) для створов, водосборы которых относятся к III типу (№ 5, 7). Для высокогорных створов (№ 1), т.е. принадлежащих к I группе водосборов, относительная ошибка составила 73%. Этот факт объясняется тем, что данные частные водосборы наиболее приближены к условиям горных территорий, для которых опыт адаптации существует [13]. Для всех прочих расчетных створов (№ 3, 6, 10, 11),

Таблица 2

**Объем стока взвешенных наносов на исследованных гидрометрических постах (тонн)
с 2012 по 2014 г.**

Тип частно- го во- досбора	Но- мер ство- ра	Натурные данные			MUSLE		
		расчетный период					
		29.07– 5.08 2012	7.06– 30.06 2013	19– 24.06 2014	29.07– 5.08 2012	7.06– 30.06 2013	19– 24.06 2014
I	ВГ1	8.7	2.1	12.6	–	–	47.1
II	3	440	0	0	25.7	–	–
III	5	0.57	0.5	0.46	0.50	–	–
II	6	106	84.8	0	3.73	2.63	–
III	7	2.32	0	0	2.19	–	–
II	106	0	1.20	0	–	0.04	–
II	116	0	36.1	0	–	1.03	–

Суточные значения стока наносов (29.07–5.08.2012)

Створ	W , т	M_R , т/км ² сут	Доля от общего, %	MUSLE, т	Доля от общего, %
3	440	10.2	99.3	25.7	90.5
5	0.567	0.04	0.1	0.5	1.8
7	2.32	0.04	0.5	2.19	7.7
Σ (т)	443		100	28	100

относящихся к II группе водосборов, результаты натуральных и модельных расчетов не сопоставимы. Возможность применения эрозионных моделей к условиям вулканического бассейна лимитируется участками распространения легкоразмываемых вулканических пород, где перенос материала осуществляется плоскостным смывом. Для них требуется уточнение методов расчета коэффициентов (2) – (6) уравнения USLE и его модификаций MUSLE. Одновременно внутрисуточные (в том числе пульсационные) колебания стока, а также высокие темпы фильтрации воды, определяют необходимость модификации самой структуры уравнения (1).

Результаты моделирования и натуральных наблюдений свидетельствуют о максимальном стоке наносов с водосборов II типа, и минимальном – с водосборов III типа (табл. 3). Продольные изменения водного стока в пределах лахаровых долин определяют положение зон аккумуляции материала. Так, средний объем аккумуляции материала между створами 3 и 6 (верхняя часть лахаровой долины) в период наличия здесь постоянного стока составляет 319 т, что соответствует суточной аккумуляции 53 т/сут (табл. 3). Учитывая расстояние между створами 4.7 км, интенсивность отложения материала можно оценить величиной 11.3 т/день, что при плотности пирокластического материала, слагающего лахаровые долины, 1000 кг/м³ [14], ширине долины 30 м, позволяет оценить слой аккумуляции в течение трех летних месяцев, равный 7.2 мм. Следует учитывать, что такие условия соответствуют значительным потерям поверхностного стока, что значительно снижает вынос материала. При выпадении обильных осадков и формировании устойчивого стока по ширине всей долины наблюдаются значительные большие по объему “селеподобные” перемещения материала, что приводит к формированию слоя отложений мощностью до нескольких метров [15]. Подобные события в долине р. Сухой Елизовской приводили к формированию 1–2-метровых массивов отложений, связанных со сходом лахара в сентябре 2010 года. Таким образом, мощность денудации в вулканических районах определяет постоянное накопление материала на дне долин (скоростью до 1 см/год) даже в периоды низкой водности, а в периоды схода лахаров скорость аккумуляции достигает экстремальных значений – нескольких метров в год.

Выводы

Двухъярусное строение рельефа Восточного вулканического района полуострова Камчатка определяет существование на склонах вулканов различных условий формирования стока наносов. Наиболее контрастные условия наблюдаются между горными реками (в основном с порожисто-водопадными руслами) и реками, протекающими в пределах лахаровых долин, формирующихся в толще легкоразмываемых отложений.

Реки лахаровых долин демонстрируют экстремальные показатели стока наносов. Суточные колебания стока наносов здесь достигают десятков тысяч мг/л, что соответствует 100-кратному изменению стока наносов в течение суток. На этом фоне, даже в периоды низкой водности, происходит постоянное накопление материала на дне долин (около 1 см/год), а во время схода лахаров скорость аккумуляции достигает экстремальных значений – нескольких метров в год.

Проведена успешная адаптация модифицированного уравнения почвенной эрозии (MUSLE) для отдельных водосборов вулканических районов. Для моделирования стока наносов рек, протекающих в пределах лахаровых долин, требуется разработка алгоритма учета внутрисуточных (в том числе пульсационных) колебаний стока и описание процесса формирования подруслового стока.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-05515 и 15-05-03752) и проекта PEOPLE MARIE CURIE ACTIONS International Research Staff Exchange “*Fluvial processes and sediment dynamics of slope channel systems: Impacts of socio economic- and climate change on river system characteristics and related services*”. Полевые работы выполнены при поддержке проекта РНФ № 14-27-00083. Авторы выражают благодарность сотрудникам природного парка “Налычево”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опасные русловые процессы и среда обитания лососевых рыб: Камчатка / Под ред. С.Р. Чалова, В.Н. Лемана, А.С. Чаловой. М.: Изд-во ВНИРО, 2014. 240 с.
2. Краевая Т.С. Сухие реки районов Ключевской и Авачинской групп вулканов // Вопр. геогр. Камчатки. 1964. Вып. 2. С. 56–62.
3. Куксина Л.В., Чалов С.Р. Сток взвешенных наносов рек территорий современного вулканизма Камчатки // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 103–110.
4. Белозерова Е.В., Чалов С.Р. Определение содержания взвешенных частиц в речных водах оптическими методами // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2013. № 6. С. 39–45.
5. Wischmeier W.H. and Smith D.D. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning // Trans. Int. Congr. Soil Sci., 7th, 1960. P. 418–425.
6. Williams J.R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor // Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. 1975. ARS. S-40. P. 244–252.
7. Sadeghi S.H.R., Mizuyama T., Miyata S., Gomi T., Kosugi K., Mizugaki S. and Onda Y. Is MUSLE apt to small steeply reforested watershed? // Journ. of Forest Resources. 2007. No. 12. P. 270–277.
8. Stewart B.A., Woolhiser D.A., Wischmeier W.H., Caro J.H. and Frere M.H. Control of Pollution from Cropland // U.S. EPA Report No. 600/2-75-026. 1975.
9. Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M. and Iverson L.R. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS // Int. Journ. Geogr. Inf. Syst. 1996. No. 10. P. 629–641.
10. Tweddles S.C., Eschlaeger C.R. and Seybold W.F. An Improved Method for Spatial Extrapolation of Vegetative Cover Estimates (USLE/RUSLE C factor) using LCTA and Remotely sensed imagery. Champaign, IL, Construction Engineering Research Laboratory, 2000. 32 p.
11. Borselli L., Cassi P. and Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment // Catena. 2008. No. 75. P. 268–277.
12. Vigiak O., Borselli L., Newham L.T.H., Mcinnes J. and Roberts A.M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio // Geomorphology. 2012. No. 138 (1). P. 74–88.
13. Lazzari M., Gioia D., Piccarreta M., Danese M., and Lanorte A. Sediment yield and erosion rate estimation in the mountain catchments of the Camastra artificial reservoir (Southern Italy): a comparison between different empirical methods // Catena. 2015. No. 127. P. 323–339.
14. Чалов С.Р., Есин Е.В., Айзель Г.В. Гидрологические факторы формирования ихтиофауны рек вулканических территорий (на примере рек Семячинского района, Камчатка) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 3. С. 247–257.
15. Tanarro L.M., Andrus N., Zamorano J.J. and Renschler C.S. Geomorphological evolution of a fluvial channel after primary lahar deposition: Huiloac Gorge, Popocatepetl volcano (Mexico) // Geomorphology. 2010. Vol. 122. P. 178–190.

Поступила в редакцию 09.02.2016

**SEDIMENT DISCHARGE OF SMALL RIVERS IN AREAS OF ACTIVE VOLCANISM
(River Sukhaya Elizovskaya, Kamchatka)**

S.R. CHALOV, A.S. TSYPLENKOV

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia
e-mail: srchalov@geogr.msu.ru*

S u m m a r y

Paper is devoted to the study of seasonal features of sediment run-off formation of the Sukhaya Elizovskaya small river, flowing on the active volcanoes Avachinsky and Koryaksky slopes (the Kamchatka region). Informations about diurnal (at 5–10 minutes interval) and seasonal fluctuations of water and sediments run-off in different geologic-geomorphologic conditions, specific for the basin, are provided, based on the field observations and MUSLE erosional modelling. Within the upper sections of the river network – on the volcanoes slopes and submontane territories with mean steepness – the sediment run-off is characterised 10-fold diurnal variations and is relatively low (less than 0.1 t/km² per day). Within lahar valleys the maximal sediment run-off is noted (during given periods of studying – more than 10 t/km² per day), which compounds more that 90% of solid run-off outward the Sukhaya Elizovskaya river basin. 100-fold variations of water silt content and extraordinarily high rates of material repedosition within the river valley are noted in these water streams (during given periods of studying – up to 11.3 t/day).

Keywords: sediment discharge, volcanic area, lahar valleys, Kamchatka.

Doi:10.15356/0435-4281-2017-1-104-116