

2. Государственный водный реестр Российской Федерации [Электронный ресурс]. - режим доступа: texnual.ru/gvr/index.php?card=172770. Дата обращения: 04.04.2019.

3. Беликов В.В. Компьютерное моделирование дождевого паводка, приведшего к разрушению плотины (на примере реки Дюрсо под Новороссийском) // В сб. «Безопасность энергетических сооружений», М., НИИЭС, 2003, № 11, С. 169–175

4. Aleksyuk A.I., Belikov V.V. Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities. // *Comput. Math. Math. Phys.*, 2017, Vol. 57, No.2, pp. 318–339. doi:10.1134/S0965542517020026.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660266. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Computer Unified Device Architecture (на графических процессорах NVIDIA). М.: 2017.

ФОРМЫ ЛИНЕЙНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СКЛОНОВОГО СТОКА В СРЕДНЕГОРЬЕ (НА ПРИМЕРЕ СИХОТЭ-АЛИНЯ)

*Гарцман Б.И.^{1,2}, Губарева Т.С.^{1,2}, Лупаков С.Ю.^{2,3}, Орляковский А.В.³,
Тарбеева А.М.⁴, Шамов В.В.², Шекман Е.А.²*

¹ Институт водных проблем РАН, г. Москва

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

³ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва
gartsman@inbox.ru

Введение. Генезис стока первичных элементов речной сети остаётся ключевой проблемой гидрологии, для решения которой имеющихся данных стандартных сетевых наблюдений явно недостаточно. Перспективы развития исследований открывают комплексные наблюдения на малых речных водосборах с использованием современных технических средств [2].

Известно, что в горных областях зоны избыточного увлажнения, на крутых, покрытых чехлом рыхлых отложений, склонах, метеорные воды крайне редко образуют поверхностные временные водотоки. Они движутся почти исключительно в толще склоновых отложений, при этом частично – в виде свободных потоков, сходных с поверхностными по гидродинамическим характеристикам. Наиболее значительные из них имеют линейную форму протяженностью в десятки и сотни метров, а также устойчивое местоположение с выраженной областью питания (водосбором), образуя склоновую «закрытую» дренажную сеть, вполне подобную по роли и масштабам постоянной и временной первичной гидрографической сети. Это дает основание рассматривать их как особый тип гидрологических объектов, называемых авторами общим термином «дрены».

Такие формы склонового стока в настоящее время остаются слабо изученными [7], хотя уже имеются попытки развернутой их классификации [8] и исследования их гидрологической роли [1, 4-6]. В докладе представлены результаты исследований, выполненных авторами на малых водосборах Сихотэ-Алиня в 2015-16 гг.

Объекты и методы исследований. Исследования проводились в южной части Сихотэ-Алиня (рис. 1), в бассейнах рек Падь Васькова (побережье Японского моря, Дальнегорский район) и Правая Соколовка (система Верхней Уссури, Чугуевский район Приморского края).

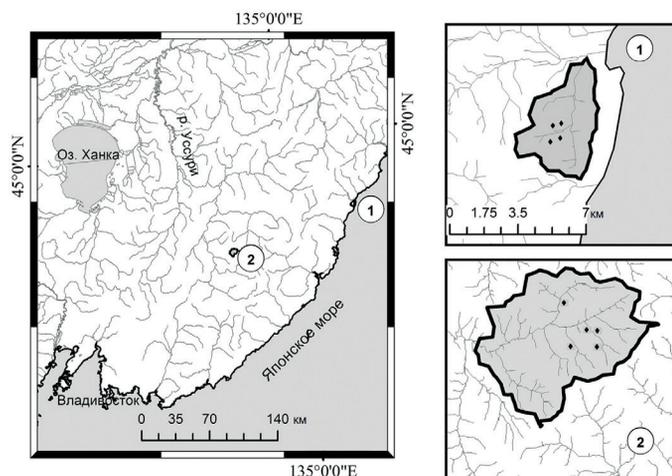


Рисунок 1. Расположение и схемы исследуемых бассейнов: 1) р. Падь Васькова; 2) р. Правая Соколовка. Значками обозначено примерное положение исследуемых дрен (см. табл. 1)

Горные сооружения Сихотэ-Алиня по высоте превышают 2000 м, сложены осадочными и изверженными породами и являются областью мезозойской складчатости [2,6]. Исследуемые бассейны представляют собой залесенное низко- и среднегорье с максимальными абсолютными высотами около 350 м для Пади Васькова и 1100 м для Правой Соколовки, многолетняя мерзлота отсутствует.

Оба бассейна располагаются в области восточноазиатского муссона умеренных широт и имеют хорошо развитую речную сеть. Климат характеризуется высокими годовыми суммами осадков, более 80% из которых выпадает в виде дождей с апреля по октябрь. Для режима рек характерны высокие летние паводки. С другой стороны, регион отличается максимальной для данных широт глубиной промерзания почв (в среднем 53–125 см). Полное оттаивание почвы происходит в мае–июне [2, 6].

Были обследованы склоны речных долин, сложенные с поверхности узкими полосами грубообломочных отложений, нисходящими вдоль склона. Эти полосы часто покрыты обильной растительностью и задернованы, в верхних частях выполняющие их глыбы при низкой скорости сползания по склону могут быть покрыты только лишайниками. В некоторых из этих образований после закладки шурфов на глубине 70–100 см наблюдалось свободное течение воды.

С использованием шурфов были выполнены 60 измерений характеристик склоновых водных потоков методом ионного паводка (смешения индикатора), применяемого обычно для измерений на валунно-каменистых руслах горных рек. В качестве индикатора применялся раствор NaCl с концентрацией 100 г/л. Непрерывная регистрация минерализации воды в контрольном створе потока (шурфе) осуществлялась мультипараметрической системой контроля качества воды YSI Professional Plus с временным шагом 5, 10 или 20 секунд при объемах заливаемого раствора от 0.25 до 2.5 л. Выполнялись также детальные топосъемки участков склонов с использованием GNSS приемников Sokkia GRX1 для высокоточной привязки и теодолита-тахеометра Sokkia SET 610.

Гидрологические характеристики дрен. Сама возможность прослеживания дрены и закладки шурфов с ожидаемым появлением воды свидетельствует о существовании именно узких линейных потоков, подобных поверхностным водотокам. Доказательства их обособленности и непрерывности на протяжении сотен метров предоставляются методом измерения расхода – качественные результаты получаются лишь при таких условиях и при хорошем перемешивании потока.

Сходство дрен с мелкими поверхностными водотоками подчеркивается подобием режима стока. На рис. 2 представлены отдельные записи уровней воды в дренах, где

хорошо видно как прохождение типичных дождевых паводков в течение летнего сезона, так и очень характерные, неизменно наблюдаемые и на малых горных ручьях [2, 3], суточные колебания стока в период межени.

Полная сводка гидрометрических измерений на дренах представлена в табл. 1. Из параметров, измеренных методом ионного паводка, наибольшей точностью характеризуются расход и модальная скорость потока, максимальная и средняя скорости менее надежны, ещё меньше точность минимальной скорости и площади сечения потока. Кроме того, измеренные таким образом значения являются осредненными как по длине участка, так и по времени измерения, которое может составлять до 12 часов и более. При всех недостатках, этот способ является единственным пригодным для массовых измерений потоков в дренах.

Максимальные скорости течения в дренах могут превышать 10 см/с. Модальные значения несколько ниже, но остаются в диапазоне скоростей свободного течения, характерных для малых поверхностных водотоков районов исследований в бытовом их состоянии. Средние скорости в дренах могут составлять от нескольких сантиметров до долей сантиметра в секунду. Минимальные скорости течения порядка 0.2-0.002 см/с указывают, что русла дренах выработаны слабо, их потоки не имеют четких границ и переходят от свободного течения к фильтрационному плавно как по сечению и простиранию, так и при изменениях водности.

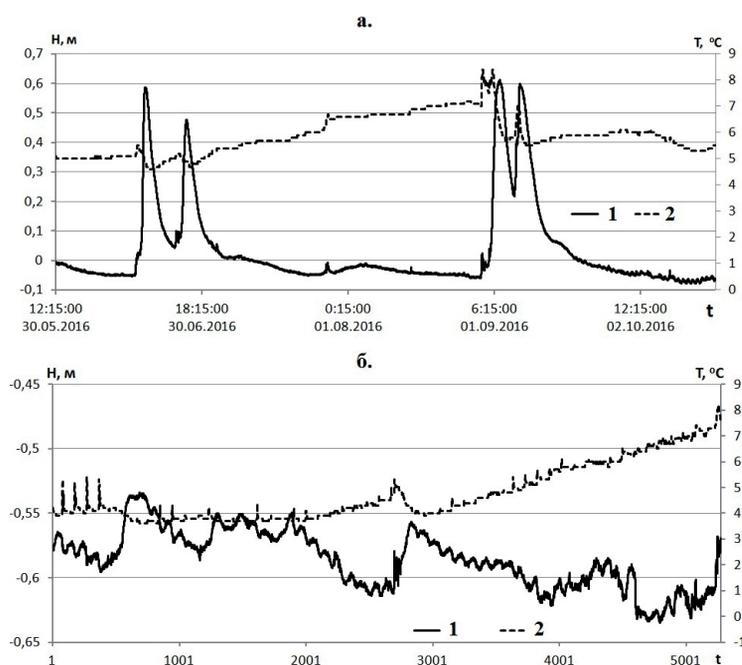


Рисунок 2. Результаты наблюдений приборами с непрерывной записью:
 а) уровень и температура воды в дрене Вафельной с 30 мая по 18 октября 2016 года;
 б) уровень и температура воды в дрене Антропоген с 27 мая по 21 июля 2017 года
 1- запись уровня воды; 2- запись температуры воды (интервал записей 15 мин)

Площади водосборов дренах (см. табл. 1) оценены грубо приблизительно по материалам учащенных наблюдений в период экстремального паводка 2016 года в Приморье, вызванного тайфуном LIONROCK. Выполненные авторами синхронные наблюдения за осадками и стоком на малых водосборах указывают на длительный (не менее 3 суток) период т.н. 100%-го стока. Слой стокообразования и слой осадков в этот период должны практически совпадать, что позволило вычислить площади водосборов четырех дренах. Это единственная возможность оценить водосборы дренах, чьи границы не имеют внешних признаков и, вероятно, временами меняют свое положение.

Полученные значения площадей водосборов дрен бассейна р. Правая Соколовка от 1 до 2.8 га представляются вполне реалистичными. Считая дрена Антропоген нерепрезентативной, можно принять оценку средней площади водосбора дрен в этом районе в 2-2.5 га в качестве первого приближения. По площади водосбора рассчитаны модули стока дрен. В частности, максимальный измеренный в период паводка 2016 года модуль стока составил около 700 л/с*км², в то время как для малых водотоков его величина достигала примерно 400 л/с*км². Соотношение этих величин представляется вполне реалистичным с точки зрения представлений о редукации максимального стока, что косвенно подтверждает принятые значения площадей водосборов.

На рис. 3 представлены примеры зависимостей для дрен, аналогичных т.н. гидроморфометрическим, где в качестве измеряемой переменной выступает расход. На фоне прямой связи скоростей и площадей сечения потоков с расходом хорошо выражен гистерезис. В этом отражается эффект промывки дрен в периоды высокой водности, за которыми, очевидно, следуют периоды кольматации при маловодье.

Таблица 1. Гидроморфометрические характеристики дрен (бассейны рек Падь Васькова и Правая Соколовка)

Дрена	Длина участка измерения, м	Уклон*	Площадь водосбора, га	Число измерений	Расход, л/с	Скорость течения, см/с				Площадь сечения, см ²
						Максимальная	Модальная	Средняя	Минимальная	
Объекты в бассейне реки Падь Васькова										
руч. Сухой	30	(0.12)	51	2	<u>-</u> ^{**} 3.91	<u>10.4-7.6</u> 9.0	<u>7.9-5.4</u> 6.7	<u>7.2-4.6</u> 5.9	<u>2.4-1.2</u> 1.8	<u>-</u> 850
Вафельная 1	151	(0.15)	-	5	<u>4.12-6.32</u> 5.22	<u>13.2-3.4</u> 6.0	<u>4.6-2.7</u> 3.5	<u>3.0-2.0</u> 2.3	<u>1.5-0.7</u> 1.1	<u>2100-2040</u> 2070
Вафельная 2	162	(0.15)	-	2	<u>5.85-7.36</u> 6.61	<u>9.3-6.8</u> 8.0	<u>7.4-5.6</u> 6.5	<u>5.0-3.1</u> 4.1	<u>2.2-0.8</u> 1.5	<u>2360-1170</u> 1770
Марципан	126	(0.24)	-	3	<u>1.51-2.44</u> 1.94	<u>5.9-2.9</u> 4.4	<u>3.7-2.4</u> 3.1	<u>2.9-0.8</u> 2.0	<u>0.6-0.16</u> 0.4	<u>1920-760</u> 1180
Мармеладная	184	(0.24)	-	4	<u>0.504-2.28</u> 1.19	<u>11.3-2.2</u> 5.2	<u>6.9-1.4</u> 3.3	<u>3.4-0.6</u> 1.8	<u>0.6-0.15</u> 0.4	<u>3760-202</u> 1320
Объекты в бассейне реки Правая Соколовка										
Антропоген	10.3	0.240	1.0	15	<u>0.03-6.95</u> 1.26	<u>10.6-1.2</u> 3.8	<u>6.0-0.6</u> 2.2	<u>4.2-0.12</u> 1.0	<u>1.0-0.01</u> 0.2	<u>1650-87</u> 882
Дремучая	70.0	0.233	1.45	11	<u>0.04-1.55</u> 0.25	<u>8.4-0.9</u> 2.7	<u>6.2-0.4</u> 1.6	<u>3.0-0.11</u> 0.7	<u>0.44-0.03</u> 0.13	<u>513-120</u> 263
Безымянная	155.2	0.192	2.8	11	<u>0.15-4.81</u> 1.29	<u>8.5-1.2</u> 3.7	<u>6.6-0.7</u> 2.6	<u>3.9-0.14</u> 1.4	<u>0.69-0.03</u> 0.23	<u>1240-350</u> 594
Ботаническая	108.4	0.261	2.1	7	<u>0.15-1.19</u> 0.48	<u>4.9-2.2</u> 3.1	<u>3.5-1.1</u> 1.9	<u>0.82-0.20</u> 0.44	<u>0.21-0.04</u> 0.11	<u>1490-412</u> 1040
Наледная	6.7	(0.30)	-	1	<u>-</u> 0.11	<u>-</u> 1.0	<u>-</u> 0.14	<u>-</u> 0.04	<u>-</u> 0.01	<u>-</u> 2820

*- значения уклона в скобках оценены по данным ЦМР SRTM, без скобок – по данным детальной топогеодезической съемки.

** - в числителе приводятся наименьшее и наибольшее значение (при единственном измерении – прочерк), в знаменателе среднее.

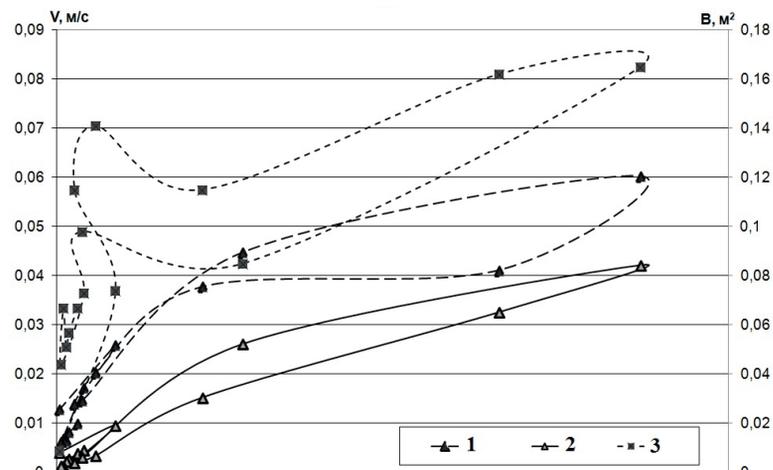


Рисунок 3. Пример гидроморфометрической зависимости для потоков в дренах (дрена Антропоген) - «петлеобразные» зависимости модальной (1) и средней (2) скоростей течения, а также площади сечения (3) потока от модуля стока

Заключение. Крупные линейно организованные подповерхностные водотоки на склонах широко распространены в среднегорье гумидной зоны и представляют собой форму организации значительной части склонового стока. Дрены устойчиво локализованы, их протяженность составляет десятки-сотни метров, размеры наиболее крупных попадают в диапазон первичных элементов речной сети. Потоки в дренах часто имеют турбулентный характер, причем их гидравлические характеристики (уклоны, скорости течения, расходы, модули стока) в целом близки к характеристикам первичных водотоков в бытовом состоянии.

Наиболее явное отличие гидродинамики потоков дрен от поверхностных водотоков обусловлено относительно слабой выработанностью их русел, из-за чего систематически осуществляется переход от состояния свободного потока к фильтрационному потоку и обратно. Дрены образуют целостную сеть склонового масштаба, органически дополняющую речную сеть малого речного бассейна и обеспечивают самостоятельный важный этап формирования речного стока.

Литература

1. Василенко Н.Г. Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2013. 672 с.
2. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокообразования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 589-599.
3. Кичигина Н.В., Губарева Т.С., Шамов В.В., Гарцман Б.И. Трассерные исследования формирования речного стока в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2016. № S5. С. 60-69.
4. Михайлов В.М. Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2013. 244 с.
5. Полуниин Г.В. Динамика и прогноз экзогенных процессов. М.: Наука, 1989. 230 с.
6. Тарбеева А.М., Гарцман Б.И. Морфогенез первичных звеньев гидрографической сети: натурные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 114-121.
7. Angermann L., Jackisch C., Allroggen N., Sprenger M., Zehe E., Tronicke J., Weiler M., Blume T. Form and function in hillslope hydrology: characterization of subsurface flow based on response observations // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2017. Vol. 21. Pp. 3727-3748. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3727-2017>.
8. Brutsaert, W. Hydrology: An Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 605 p.