

ОСОБЕННОСТИ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ В РУСЛОВОЙ СЕТИ МАЛЫХ РЕК И ОВРАГОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА

Москвин Юрий Павлович

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник,
Государственный гидрологический институт

25.00.27

ypmosk@gmail.com

Аннотация. Данные многолетних экспедиционных наблюдений за снежным покровом, позволили количественно оценить неравномерность распределения запасов воды в снежном покрове на речных водосборах. Рассмотрены условия формирования весеннего стока на малых водосборах полуострова Ямал, а также особенности проведения гидрометрических работ. Построена карта слоев стока весеннего половодья на полуострове Ямал.

Ключевые слова: Закономерности распределения снега, коэффициенты стока, карты слоев половодья, особенности проведения гидрометрических работ и подсчета стока в снежном русле.

CHARACTERISTICS OF SNOW ACCUMULATION IN CHANNEL NETWORK OF SMALL RIVERS AND RAVINES OF THE FAR NORTH OF WESTERN SIBERIA AND CONDITIONS OF MAXIMUM FLOW FORMATION

Moskvin Iurii Pavlovich

Ph.D. of Geographical Sciences, Senior Research Fellow
National Institute of Hydrology

Abstract. Long-term expeditionary snow cover observation data coupled with results of aerial gamma-ray surveys enabled assessing nonuniformity in distribution of water storage in the snow cover of watersheds. Conditions of spring flow formation in small watersheds of the Yamal peninsula as well as specific features of performing hydrometrical work are analyzed. Spring flood maps of the Yamal peninsula are constructed.

Key words: Regularities of snow cover distribution, runoff coefficients, maps of flood layers, specific features of performing hydrometrical work and calculating runoff in a snow course.

Территория, занятая Ямалом, Гыданским и Тазовским полуостровами, представляет собой холмистую равнину с относительно большей густотой речной и овражной сети, имеющей достаточно глубокие (20-40 м) врезы речных долин и оврагов [1]. Зимний период в арктической части Западной Сибири характеризуется сильными ветрами, что создает исключительно благоприятные условия для снегопереноса по площади и накопления снега в речной и овражной сети. Для рассматриваемого района площадь, занятая врезами гидрографической сети, составляет 6-15% площади

водосборов. В весенний период в отдельных оврагах глубина снежного покрова достигает 6-7 метров, что при средних плотностях снега 0,5-0,6, делает невозможным инструментальное определение высот снежного покрова.

Экспедиционные исследования, проведенные в течение ряда лет ГГИ в северной и южной частях полуострова Ямал, позволили разработать методику выполнения максимальных снегосъемок в условиях овражной местности Крайнего Севера Западной Сибири. Общие правила проведения снегосъемок изложены в Указаниях [2]. Как показали наблюдения, на

рассматриваемой территории снегомерные маршруты следует располагать на трех, наиболее характерных для данной местности элементах ландшафта:

- плоских водораздельных пространствах,
- в широких (более 400 м) долинах рек,
- в оврагах и узких долинах рек (менее 400 м).

При значительной неравномерности снегозапасов на различных элементах ландшафта точность расчета средних для водосбора запасов воды в снеге зависит от правильности определения площадей каждого ландшафта. Анализ карт масштаба 1:25000 и результатов нивелировок различных типов оврагов и речных долин показал, что для рассматриваемого района карты искажают (увеличивают) истинную ширину оврагов и речных долин малых рек на 30-40%, а в отдельных случаях – до 100%. Поэтому определение ширины оврагов должно производиться либо по нивелировочным профилям, либо по материалам аэрофото съемки с использованием стереоскопа.

Определение ширины оврагов на их поперечных профилях обычно не вызывает особых трудностей, поскольку границы оврагов достаточно хорошо прослеживаются по резкому изменению уклонов поверхности. Однако в отдельных случаях бровки оврага (либо одна из бровок) слабо выражены. Для устранения указанной неопределенности принято было считать бровкой точку, в которой увеличение уклона поверхности склона достигает значенной 50‰.

Для производства наблюдений выбирались несколько оврагов различной ширины. На выбранных оврагах разбивались поперечники таким образом, чтобы охарактеризовать снегозапасы в них во всем диапазоне их поперечных размеров (от 0 до 400 м).

Начало и конец поперечников закреплялись временными реперами и вешками, профили поперечников детально нивелировались и увязывались с временными реперами. При проведении максимальных снегосъемок высота снега в оврагах не измерялась, выполнялась лишь нивелировка поверхности снежного покрова и реперов на поперечниках. Высота снеж-

ного покрова в отдельных точках на поперечнике определялась при камеральной обработке совмещенных профилей оврагов и поверхности снежного покрова.

Плотность снежного покрова в оврагах определялась не менее чем в 3-х точках, с различной высотой снега (для оврагов Ямала, с 2-х, 4-х и 6-ти метровым снегом).

В речных долинах, при значительной крутизне склонов, особенно на вогнутых берегах, весной образуются надувы снега, обычно от 10 до 25 м шириной с высотой снежного покрова до 4-7 м. При этом особенности ветрового снегопереноса состоят в том, что в ложе речной долины высота снежного покрова, как правило, меньше, чем на водораздельных пространствах, то есть, наблюдается не только снос снега с водораздельных пространств в речные долины, но и вынос снега из речных долин. Поэтому, чем шире речная долина, тем меньше в ней проявляются явление снегонакопления. Экспедиционными исследованиями установлено, что запасы воды в снежном покрове в долинах шириной более 400 м, с учетом присклоновых надувов, становятся равными указанной величине на открытых водораздельных пространствах. В более узких речных долинах, за счет присклоновых надувов, и, особенно, в оврагах, запасы воды в снеге значительно увеличиваются. Высота снежного покрова в оврагах зависит не только от их ширины, но и от общей снежности зимнего периода. В годы с большим количеством зимних осадков овраги шириной до 60-70 м заносятся снегом полностью, а овраги шириной до 20 м ежегодно заполняются снегом по бровки. Ориентация оси оврага, как показали наблюдения, на степень заполнения оврага снегом сказывается только в устьевых участках, на расстоянии 70-100 м от выхода в долину рек. Это обстоятельство в значительной мере упрощает разработку методов расчета снегозапасов.

Следует отметить, что южный (Новопортовский) гидрологический стационар ГГИ расположен в местности прибрежного типа. Здесь абсолютные отметки верховьев

оврагов изменяются от 25 до 40 м, подошв оврагов – от 8 до 12 м. Преобладающие грунты в рассматриваемом районе – пылеватые пески. Указанные особенности определяют морфологию оврагов, которые могут быть охарактеризованы как относительно узкие и не глубокие в верхних своих частях, однако имеющие значительную протяженность.

Северный (Бованенковский) стационар ГГИ расположен в местности холмисто-увалистого типа. Абсолютные отметки верховьев оврагов изменяются от 40 до 50 м, подошв оврагов – от 10 до 15 м. Грунты в этом районе – супеси и легкие суглинки. В связи с этим морфология оврагов значительно отличается от морфологии исследованных оврагов в южной части Ямала. Здесь, как правило, даже в верхних частях овраги достаточно широкие (100-200 м), имеют лопастную форму и довольно значительную глубину (20-25 м).

Морфологические параметры поперечников оврагов и долин малых рек описываются тремя основными характеристиками: шириной, глубиной и формой профиля оврага или долины. При определении указанных характеристик вызывает затруднение, прежде всего, чисто качественное определение формы оврага или долины малых рек. Кроме того, определение глубины оврагов на конкретном поперечнике требует выполнения нивелировки его профиля, поскольку использование для этих целей карт масштаба 1:25000, как уже отмечалось выше, дает значительные расхождения получаемых величин в сравнении с результатами нивелировок.

Для упрощения решения рассматриваемой задачи была исследована пространственная устойчивость отношений морфометрических характеристик врезов гидрографической сети. Исходной предпосылкой к подобному решению явились следующие соображения:

- современные эрозионные врезы гидрографической сети представляют собой достаточно устойчивый во времени результат взаимодействия поверхностных вод, многолетней мерзлоты, состава грунтов, растительного покрова и базиса эрозии.

- для отдельно взятого района, учитывая приблизительное равенство перечисленных факторов, должно соблюдаться подобие морфологических форм, то есть при одинаковых площадях водосборов размеры дренирующих их оврагов должны быть одинаковы.

Исходя из указанных соображений, следует ожидать наличия определенных закономерностей в соотношениях ширины, глубины и формы оврагов на конкретных поперечниках. Для проверки этого предположения строились зависимости вида $H = f(B)$, где H – максимальная глубина оврагов и речных долин, B – их ширина. Полученные результаты подтвердили исходные предположения о наличии закономерностей в соотношениях ширины и глубины оврагов. Следует отметить, что указанная зависимость отражает соответствие морфологических форм гидрографических врезов для различных местностей, где расположены южный и северный стационары ГГИ, несмотря на упомянутое различие в высотных отметках водосборов, грунтов и слоях стока. Устойчивость подобных связей по территории Ямала подтверждается ранее рассмотренной характеристикой оврагов, где указывалось, что овраги в районе северного стационара, ввиду значительных перепадов высот, имеют глубокие врезы, однако здесь же наблюдаются и большая ширина оврагов в самых верхних их частях. Выборочная проверка, выполненная по картам и аэрофотоматериалам на других частях полуострова Ямал, также подтверждает полученную зависимость. Это обстоятельство позволяет использовать для анализа распределения снежного покрова в оврагах единую морфологическую характеристику – ширину оврага на выбираемых поперечниках.

Экспедиционные исследования процессов снегонакопления, выполненные в течение ряда лет (1983-1991 гг.) в различных частях полуострова Ямал, позволили получить зависимость коэффициента заполнения оврагов снегом ($K_{сн}$) от отношения средней высоты снежного покрова на водораздельных пространствах ($h_{сн}$, м) к ширине оврагов (B , м). Указанный

коэффициент ($K_{\text{сн}}$) представляет собой соотношение площади сечения снежного покрова к площади сечения самого оврага на конкретном поперечнике ($K_{\text{сн}} = F_{\text{сн}}/F_{\text{ов}}$, где $F_{\text{сн}}$ – площадь снежного покрова в поперечном сечении оврага, $F_{\text{ов}}$ – площадь поперечного сечения оврага). При отсутствии снега в овраге $K_{\text{сн}} = 0$, если же овраг занесен снегом до линии, соединяющей его бровки, то $K_{\text{сн}} = 1$.

Полученная зависимость имеет вид:

$$K_{\text{сн}} = 59 h_{\text{сн}} / B \leq 1 \quad (1)$$

Средняя высота снега на конкретном поперечнике оврага ($H_{\text{сн}}$, м), полученная с учетом обобщения соотношений морфологических форм оврагов и формулы (1), принимает вид:

$$H_{\text{сн}} = 184,4 h_{\text{сн}} / B + 0,38 \quad (2)$$

Как установлено данными наблюдений за различные годы, плотность (ρ , г/см³) снежного покрова в оврагах зависит от его высоты (H , м), и может быть определена по зависимости:

$$\rho = 0,0337 H + 0,34 \quad (3)$$

Таким образом, запасы воды в снеге на конкретном поперечнике оврага ($S_{\text{ов}}$, мм), можно рассчитать по формулам:

для южной половины Ямала

$$S_{\text{ов}} = 1127300 (h/B)^2 + 62200 (h/B) + S_{\text{вд}}, \quad (4)$$

для северной половины Ямала

$$S_{\text{ов}} = 1127300 (h/B)^2 + 65800 (h/B) + S_{\text{вд}}, \quad (5)$$

где, $S_{\text{вд}}$ – запасы воды в снеге на водоразделе, мм.

С учетом выше указанного, при наличии данных о ширине оврагов можно проводить расчет средней высоты снега и средних запасов воды в снежном покрове для конкретного поперечника оврага или долины реки, в зависимости от запасов воды в снеге на водоразде-

льных пространствах, определяемых сетевыми метеорологическими станциями. При выполнении расчетов максимальных влагозапасов в снеге на водосборах конкретных рек используются материалы аэрофотосъемок, по которым выделяется гидрографическая сеть с шириной врезов до 400 м. Полученная сеть по всей длине разбивается поперечниками через 250 м. Затем по приведенным зависимостям (4) и (5) определяются запасы воды в снежном покрове на каждом поперечнике, после чего подсчитываются общие запасы воды на водосборах рек как средневзвешенные, с учетом овражности указанных водосборов. Сравнение результатов расчета с данными максимальных снегосъемок сетевых метеостанций, выполненное за период экспедиционных наблюдений, показало, что недоучет влагозапасов сетевыми метеостанциями в снеге овражной сети составляет от 22 до 27% от их величины на водораздельных пространствах.

В связи с изложенными особенностями снегонакопления в овражной сети и долинах малых рек районов Крайнего Севера, следует особо рассмотреть вопросы гидрологического обоснования проектов строительства линейных сооружений в этом регионе. Во избежание подтопления и разрушения инженерных сооружений, пересекающих овраги и долины ручьев, следует предусматривать пропуск талых вод. Максимальный уровень на реках, при отсутствии наблюдений, определяется, как правило, по рассчитанному максимальному расходу воды заданной обеспеченности, используя зависимости $Q = f(H)$ для конкретного створа. Однако, для малых рек и оврагов в рассматриваемом районе такой подход к определению максимальных уровней неприемлем поскольку в начале весеннего снеготаяния сток в оврагах и на малых реках начинается поперек снежного покрова по оси ложбины в снежном русле. В течение 2-4 суток после начала стока вода промывает себе снежное русло, которое постепенно понижается в толще снега, пока достигает дна оврага (реки). В связи с этим максимальные уровни наблюдаются в начале весеннего периода, а максимальные расходы

– после размыва ручьем снежной толщи, при этом высотная отметка уровня воды соответствующего максимальному расходу значительно ниже уровня начального периода стока.

Как показали наблюдения, мезорельеф поверхности снега в оврагах и долинах малых рек имеет достаточно сложный характер, зачастую по длине оврага (реки) наблюдаются воронки, заструги, снежные обрывы и т.д. Поэтому определение нижней отметки поверхности снежного покрова носит в достаточной степени неопределенный характер. В связи с вышесказанным аппроксимация эмпирических зависимостей, полученных далее по результатам наблюдений, выполнялась по огибающим наивысших точек, то есть, при равных условиях снежности и ширины оврагов, расчет проводился по наивысшим из минимальных отметок возможных профилей снежного покрова. Такой прием позволяет определять наивысшие уровни весенних вод, с некоторым гарантированным превышением относительно результатов измерений отдельного года и всецело оправдан, учитывая неопределенность ежегодного формирования мезорельефа поверхности снежного покрова в оврагах и руслах малых рек.

В результате анализа имеющихся материалов за плоскость отсчета минимальных высот снежного покрова на конкретном поперечнике принималась отметка русловых бровок ручьев в оврагах, а где постоянные русла ручьев отсутствуют – нижняя точка профиля оврагов. Нижняя точка профиля оврага достаточно хорошо отыскивается на поперечниках при площади водосборов оврагов до 1,5-2,0 км². Именно эта площадь обеспечивает существование постоянного водотока, который начинает вырабатывать собственное русло. По мере увеличения площади водосбора ручья, как правило, имеют сложный профиль долины с пойменными участками, русловыми бровками и хорошо выраженным руслом.

По материалам наблюдений получена зависимость минимальной высоты снежного покрова на поперечниках ($h_{\text{сн. мин}}$) от вышеуказанного коэффициента $K_{\text{сн}}$. По причинам,

указанным ранее, зависимость проведена как огибающая наивысших точек. Совместное решение уравнений, аппроксимирующих полученную зависимость и уравнение (1), позволило получить формулу (6) для расчета нижней отметки поверхности снежного покрова (фактически являющейся отметкой максимального уровня воды на дату начала весеннего стока), в зависимости от ширины конкретных оврагов (B) и общей снежности зимнего периода, выраженной через среднюю высоту снежного покрова на водораздельных пространствах ($h_{\text{сн}}$):

$$h = 27,4 (h_{\text{сн}}/B)^{0,36} \quad (6)$$

Полученное уравнение может быть использовано для расчета максимальных уровней воды весеннего половодья в оврагах и речных долинах шириной до 400 м.

Отдельный интерес представляет собой организация проведения гидрометрических работ и подсчет стока на малых реках и ручьях, в рассмотренных условиях полного или частичного заполнения снегом долин малых рек и ручьев.

Для малых рек и ручьев в рассматриваемом регионе характерен пилообразный гидрограф стока весеннего половодья со значительными внутрисуточными колебаниями расходов воды. Такой тип гидрографа весеннего половодья объясняется:

- режимом внутрисуточного хода водоотдачи из снежного покрова, характерного для открытых, незащищенных лесом пространств,
- малым временем добегания талых вод,
- незначительной аккумулялирующей способностью самих водосборов, расположенных в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты.

Показатель амплитуды внутрисуточной изменчивости стока ($a_{\text{вс}} = (Q_{\text{макс}} - Q_{\text{миним}}) / Q_{\text{сут}}$) зависит от площади водосбора реки, а также от погодных условий и, как правило, составляет на реках с площадью водосбора (A) до 200 км² – 0,15-0,35 (максимально 0,6-0,9), а для малых

рек ($A = 10-15 \text{ км}^2$) – 0,45-0,65 (максимально 1,1-1,2).

Экспедиционные исследования процесса формирования весеннего стока показали, что в начале водоотдачи происходит накопление талых вод в толще насыщающегося снежного покрова в руслах ручьев и рек. По мере наполнения русла талыми водами начинается их постепенный сток. Начало стока происходит по пониженной части снежного русла. Вследствие высокой плотности снежного покрова в весенний период в течение первых 5-8 дней после начала стока происходит размыв снежного дна и увеличение ширины потока. После того, как речные воды “прорежут” снежную толщу до поверхности ледяного покрова, дальнейшее увеличение площади поперечного сечения водного потока происходит за счет размыва снежных берегов. Таяние и полный вынос снега из врезов русел рек, как правило, наблюдается в течение 15-25 дней, далее процесс интенсивного размыва ложа реки резко замедляется, но не прекращается, поскольку продолжается таяние ледяного покрова.

Механизм разрушения ледяного покрова зависит от местоположения конкретного участка реки и условий формирования стока в данном году. Разрушение и всплытие ледяного покрова может происходить только на плесовых участках, там, где подо льдом сохраняется талая вода. Однако и здесь разрушение ледяного покрова отмечается в годы с повышенной весенней водностью, в маловодные годы ледяной покров длительное время сохраняется под слоем наносов и тает, практически не всплывая.

Время наступления минимумов и максимумов суточного стока зависит от площади водосбора реки (табл.1) и обычно изменяется от суток к суткам в пределах 2-4 часов.

Максимальные расходы воды весеннего половодья на малых и средних реках, как правило, наблюдаются через 4-5 дней после начала стока. Спад половодья в течение первых пяти дней происходит приблизительно с интенсивностью, близкой к интенсивности

Таблица 1

Среднее время (поясное) наступления экстремальных значений мгновенных расходов воды в течение суток

$A, \text{ км}^2$	1	10	30	60	100	200	400
Время наступления максимальных расходов воды, час	18	20	21	22	23	01	03
Время наступления минимальных расходов воды, час	06	08	09	10	11	13	15

подъема, а затем на протяжении в среднем 15 суток отмечается медленное уменьшение расходов воды. Последнее объясняется регулярным подпитыванием рек за счет таяния снега в овражной сети после схода снежного покрова на водоразделах.

Рассмотренные особенности режима стока в период весеннего половодья определяют существенные сложности в производстве гидрометрических работ и подсчете среднесуточных расходов воды.

Значительное изменение морфометрических и гидравлических характеристик речных потоков при размыве снега и льда в руслах рек весной не позволяет применять традиционные подходы к определению среднесуточных расходов воды. Согласно Наставлениям [3,4] определение среднесуточных и мгновенных расходов воды основано на использовании кривых $Q = f(H)$. При этом основными критериями надежности и правомерности использования этих кривых являются условия равномерности и степени охвата данными измерений Q и H во всем диапазоне их изменения и статистической надежности названных связей. В то же время, как уже было отмечено, особенности природных условий стока малых рек не позволяют построить однозначные связи $Q = f(H)$ для весеннего периода. Это заставляет искать

альтернативные пути измерения и подсчета весеннего стока за конкретные годы.

Для надежного учета стока рек в период весеннего половодья программа гидрометрических работ должна предусматривать проведение непрерывной регистрации уровней воды самописцами с момента начала снеготаяния. Измерение расходов должно проводиться два раза в сутки во время наступления экстремумов суточного хода стока.

Указанные сроки для каждой реки получают по результатам обработки лент самописцев. В качестве ориентировочных сведений могут быть использованы данные табл. 1.

Как отмечено выше, сроки наступления максимальных и минимальных расходов могут сдвигаться в зависимости от погодных условий в пределах, как правило, не превышающих 2-3 часов. Поэтому для подсчета среднесуточных расходов воды по данным об уровнях и измеренных расходах строятся зависимости $Q = f(H)$. Пример построения такой зависимости показан на рис. 1.

Точки, соответствующие измеренным расходам воды, соединяются последовательно прямыми линиями. В случае несоответствия времени измерения расходов воды и времени наступления минимума или максимума уровня выполняется линейная экстраполяция прямой за соответствующий период до экстремального суточного уровня, зарегистрированного самописцем.

Например, на рис. 1, расходы №10, 19 были измерены до наступления экстремальных расходов воды, а расход №15 – после прохождения экстремума. Основываясь на указанном подходе, действительные суточные максимумы стока получены путем экстраполяции линий подъема и спада стока до значений наблюдаемых уровней воды. Далее полученные зависимости $Q = f(H)$ используются для определения расходов воды по данным обработки лент самописцев с дискретностью, обеспечивающей надежный подсчет их среднесуточных значений.

После полного выноса снега из русла реки устойчивость кривой $Q = f(H)$ обычно повы-

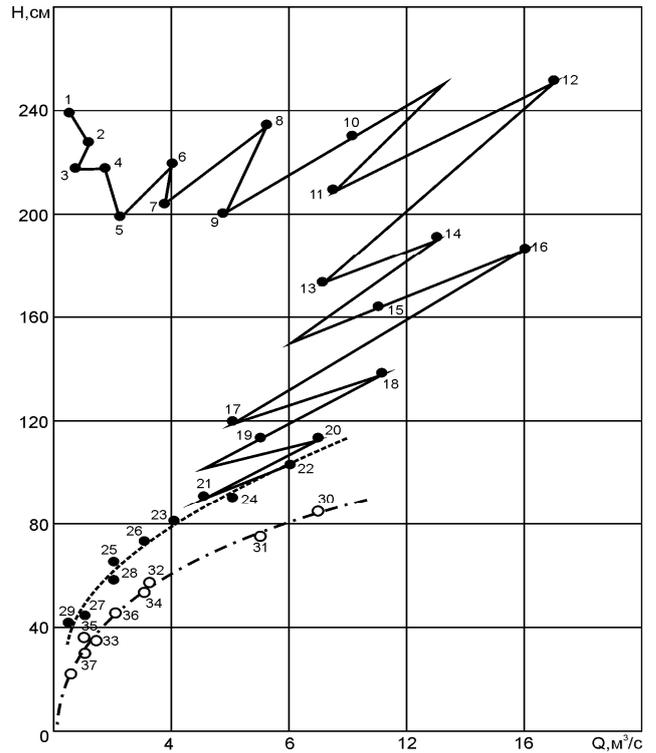


Рис. 1. Зависимость $Q = f(H)$. Река Яропензя, Новопортовский стационар.

шается, поскольку сток воды происходит по ледяному покрову. Однако в дальнейшем согласованность этой связи определяется скоростью таяния ледяного покрова. Как правило, указанная кривая (см. расходы №22-29 на рис. 1) может быть использована для подсчета стока. В случае разрушения ледяного покрова после временной кривой, соответствующей ледяному ложу, устанавливается кривая свободного русла. Если разрушения ледяного покрова не наблюдается, а лед тает на месте, переход от временной кривой к кривой свободного русла происходит постепенно. Как правило, лед в русле реки во второй половине периода весеннего половодья покрыт слоем наносов толщиной обычно 10-30 см. Нередко это вызывает определенные затруднения для установления факта наличия или отсутствия льда под слоем наносов. Указанная неопределенность может быть устранена при анализе кривой $Q = f(H)$ свободного русла, полученной на данном гидростворе в предшествующие годы и временной кривой, соответствующей

щей ледяному ложу в данный год – с момента слияния указанных кривых лед в ложе русла полностью растаял.

Постоянный анализ на графике $Q = f(H)$ взаимного расположения измеренных расхо-

дов и кривой свободного русла за предшествующие годы позволяет также установить время перехода от периода учащенных (два раза в сутки) измерений расходов воды к обычной частоте измерений.

Список литературы

1. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Под редакцией С.М.Новикова. – СПб ВВМ. 2009. 536 с.
2. Указания по производству снегомерных наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах. Валдай. Гидрометеоиздат, 1965, – 58 с.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6 ч. I и ч. II. Л., Гидрометеоиздат 1967. 398 с
4. Руководящий документ /Дополнение к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 6, ч. 1. Л., Гидрометеоиздат, 1989. – 90 с.