

## ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ КЛИМАТА И ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РЕЖИМ РЕГИОНАЛЬНОГО СТОКА И НАЛЕДЕОБРАЗОВАНИЯ ГОРНЫХ ВОДОСБОРОВ БАССЕЙНА РЕКИ ЛЕНЫ

Д.О. Сергеев, Н.Н. Романовский\*, А.В. Гаврилов\*, С.Н. Булдович\*,  
Г.С. Типенко, К. Йошикава\*\*, В. Романовский\*\*

*Институт геоэкологии РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, а/я 145, Россия, cryo2@geoenv.ru*

*\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т,  
119991, Москва, Воробьевы горы, Россия, nromanovsky@rambler.ru*

*\*\*Университет Аляски, АК 99775-7320, Фэрбенкс, Коюкук Драйв, 903, США, ffver@uaf.edu*

С помощью балансового метода на примере ситуации 1990 г. показано, что реакция речного стока на климатические изменения различна в районах сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. В районах сплошного распространения толщ мерзлых пород в условиях горного рельефа потепление климата существенно не изменяет характеристики подземного стока, но отражается на наледеобразовании. В районах прерывистого распространения толщ мерзлых пород уменьшение их площадей на 30 % приводит к сокращению расходов в руслах рек во время весенних и летних паводков на 38 %, а также к увеличению периода паводка за счет роста объема подземных коллекторов, отбирающих часть влаги, которая поступает с атмосферными осадками, при таянии снега и конденсации влаги из атмосферы.

*Многолетнемерзлые толщи, подземные воды, речной сток, изменение климата, численное моделирование*

### INFLUENCE OF THE CLIMATE DYNAMICS AND GEOCRYOLOGICAL CONDITIONS ON THE REGIME OF REGIONAL DISCHARGE AND ICING REGIME AT TYPICAL MOUNTAIN CATCHMENTS' AREAS IN THE LENA RIVER BASIN

D.O. Sergeev, N.N. Romanovskiy\*, A.V. Gavrilov\*, S.N. Buldovich\*,  
G.S. Tipenko, K. Yoshikawa\*\*, V. Romanovsky\*\*

*Institute of Environmental Geoscience RAS,  
101000, Moscow, Ulansky per., 13, build. 2, P/O box 145, Russia, cryo2@geoenv.ru*

*\*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,  
119991, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, nromanovsky@rambler.ru*

*\*\*University of Alaska Fairbanks, 903 Koyukuk Drive, Fairbanks, AK 99775-7320, USA, ffver@uaf.edu*

Using the balance method, the authors have demonstrated for the case of 1990 that the reaction of the river discharge on the climate change is different in the regions with continuous and sporadic permafrost extent. In mountains, in case of continuous permafrost extent, the climate warming has no strong influence on the river discharge but affects the volume of the ice-mounds. In case of sporadic permafrost extent, a decrease in permafrost area to 30 % leads to the decrease of snow-melting overflow up to 38 %. The period of the flood also becomes longer because of the increasing underground storage, which takes away the precipitation, snow-melting and condensation water from surfacial discharge.

*Permafrost, underground water, river discharge, climate change, numerical simulation*

### ВВЕДЕНИЕ

Зависимость характеристик подземного стока как одной из составляющих водного стока с территории от геокриологических условий изучалось ранее многими учеными [Фотиев, 1965, 1966; Михайлов, 2005; Woo et al., 2008]. Эти исследования показали, что в различных частях бассейнов крупных рек существуют неодинаковые механизмы взаимодействия подземных и поверхностных вод, что в значительной мере зависит от геокриологических условий. Последние испытывают воздей-

ствие климатических изменений, влияние которых на водный сток стало в последние годы объектом детального изучения [The Hydrologic..., 2000]. Около трети площади бассейна р. Лены расположено в пределах гор и плоскогорий. Эти территории характеризуются неоднородностью распределения атмосферных осадков по площади и неодновременным таянием снега на разных абсолютных высотах, что затрудняет анализ водного баланса [Природные..., 2001].

Авторы считают важным определение и количественное описание основных механизмов влияния природных процессов на формирование особенностей геокриологических условий и их воздействия на характеристики речного стока. Достаточно хорошая гидрогеологическая изученность Южной Якутии предопределила выбор этого района для моделирования. Предыдущие работы коллектива авторов показали, насколько площадь таликовых зон, служащих областями питания подземных вод, чувствительна к колебаниям климата [Сергеев и др., 2003, 2005; Романовский и др., 2009]. Результаты настоящего исследования демонстрируют, каким образом предполагаемые пределы изменений геокриологической обстановки могут отразиться на характеристиках речного стока на примере двух различных бассейнов, входящих в систему р. Лены.

Практическая значимость работы обусловлена необходимостью повышения качества прогнозов неблагоприятных гидрологических явлений на сибирских реках и установления причин повышения за последние десятилетия зимнего стока в устье р. Лены.

#### РЕЛЬЕФ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Участки исследований расположены в верхней части бассейна р. Лены и представлены бассейнами рек Чульман (приток Алдана, площадь бассейна 3840 км<sup>2</sup>) и Чара (приток Олекмы, площадь бассейна 4150 км<sup>2</sup>). Истоки р. Чульман расположены в пределах Станового хребта, а среднее течение относится к центральной части мезозойской Чульманской впадины. Участок достаточно хорошо изучен в геокриологическом и гидрогеологическом отношении и находится в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых толщ (ТМП) Южной Якутии [Фотиев, 1965; Южная Якутия, 1975, с. 291–311]. Территория представляет собой плоскогорье с преобладающими высотами междуречий 850–950 м и характерной глубиной расчленения рельефа порядка 150–250 м. Междуречья имеют вытянутую форму, обладают практически плоскими вершинами шириной 2–3 км и относительно крутыми (10–20°) склонами. Распространение ТМП носит прерывистый характер, они существуют исключительно в днищах и на бортах долин. Плоские междуречья являются местами атмосферного питания подземных вод. На них зимой наблюдается глубокое (до 4–5 м) сезонное охлаждение дренированных грубодисперсных элювиальных отложений.

Река Чара имеет истоки в хребтах Кодар и Удокан Станового нагорья, сложенных древними осадочными и кристаллическими породами. Хребет Кодар имеет преимущественно альпинотипный

рельеф с высотами до 2999 м и современным оледенением, хр. Удокан характеризуется гольцовым рельефом и высотами до 2174 м. Река Чара в верхнем течении расположена в Чарской рифтовой впадине шириной около 40 км. Речной бассейн расположен в области сплошного распространения ТМП.

#### МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Сравнение режима среднегодовых метеорологических (температура воздуха, осадки) и гидрологических (расход воды в русле) характеристик в сопоставимых по площади бассейнах притоков Лены (р. Чара и р. Чульман) выявило несовпадение многолетних тенденций этих характеристик. В пос. Чульман наблюдается разнонаправленность многолетних тенденций температуры воздуха и атмосферных осадков, с одной стороны, и объемов руслового стока – с другой (рис. 1, а). Сам факт этой разнонаправленности свидетельствует о сложности структуры водного баланса территории водосбора р. Чульман, в котором подземная, а для притоков Чульмана и наледная компоненты стока играют заметную роль [Всеволожский, Куринова, 1989]. Отмечается относительная синхронность аномалий осадков и речного стока в некоторые периоды (1950–1958, 1967–1970, 1982–1990, или 19 лет из 45) и резкая их асинхронность в промежутках между ними. В с. Чара не наблюдается явных многолетних тенденций характеристик стока и осадков (см. рис. 1, б), а синхронность аномалий отмечается для более длительных периодов времени (1957–1959, 1963–1969, 1972–1975, 1979–1995, или 25 лет из 38).

Анализ частных характеристик р. Чульман (рис. 2), выполненный С.Л. Березовской (*устное сообщение*), показал, что средний речной сток за зимний сезон (ноябрь–апрель) постепенно возрастал с конца 1940-х до начала 1990-х гг., как и среднее количество осадков за сентябрь. Средний речной сток за сентябрь, напротив, постепенно уменьшался, при этом температура воздуха в теплый период года (июнь–сентябрь) существенно не изменилась (см. рис. 2). Последнее обстоятельство позволяет предположить, что колебания речного стока не связаны с изменениями глубины сезонного оттаивания на участках распространения мерзлых толщ, поскольку эта величина практически не изменилась. Таким образом, рост зимнего речного стока может быть связан либо с увеличением объемов разгрузки подземных вод, либо с уменьшением доли общего стока, участвующего в наледном питании, на что косвенно указывают высокие темпы повышения среднезимних температур воздуха в Восточной Сибири [Павлов, Малкова, 2005].

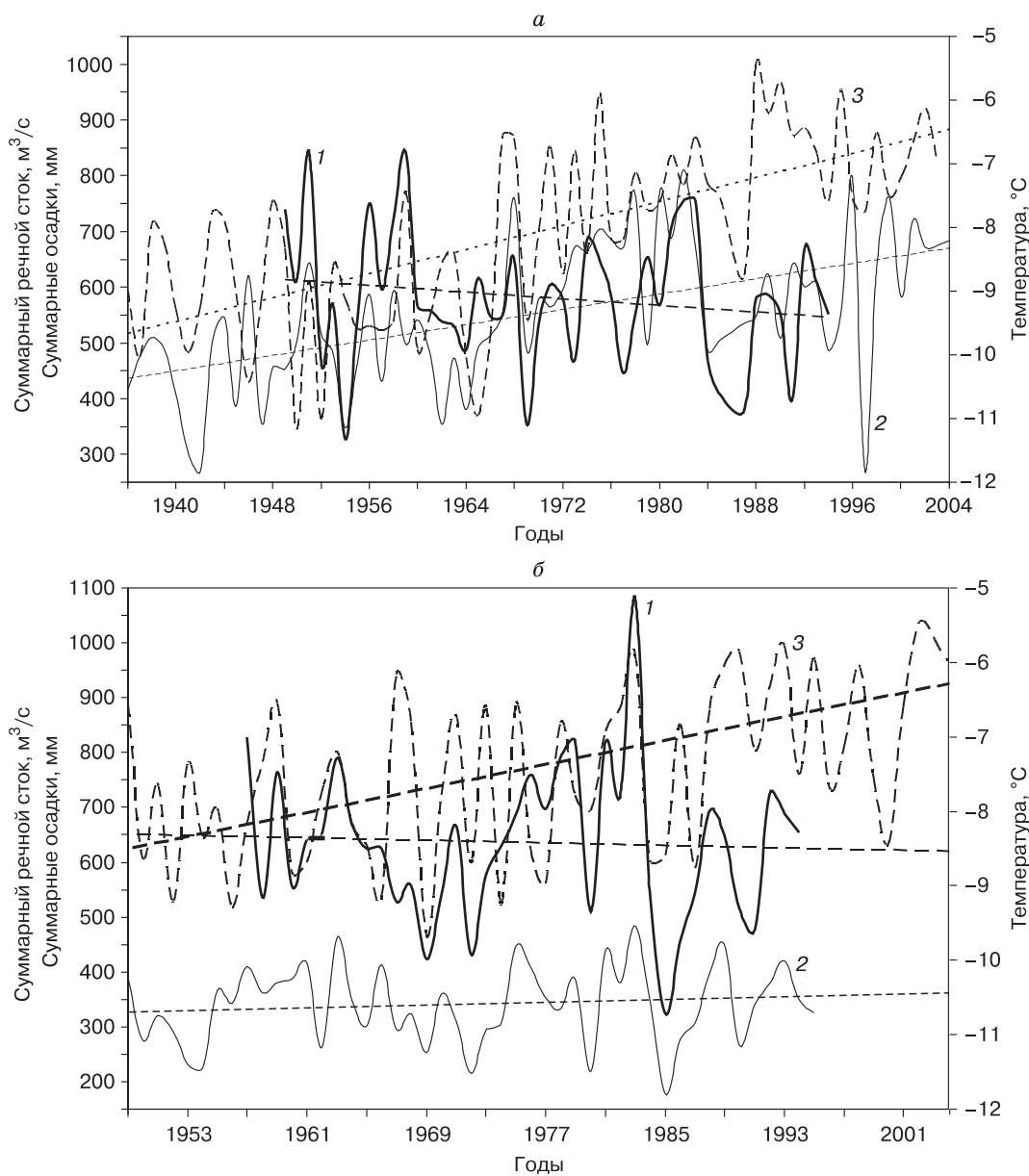
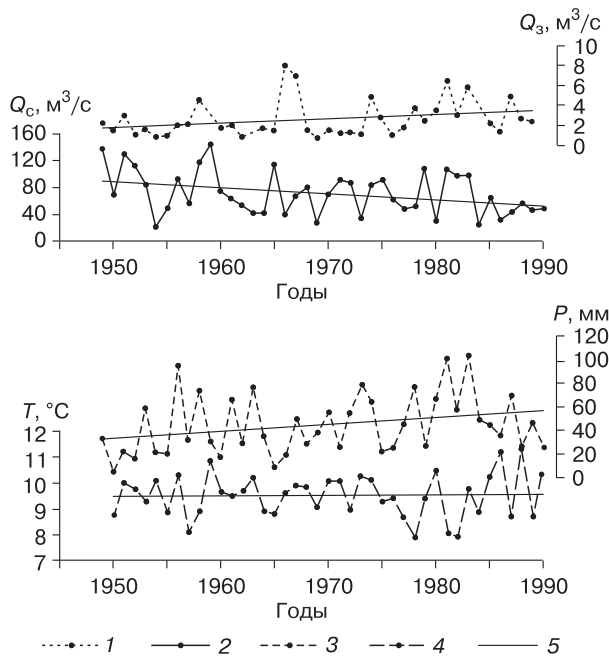


Рис. 1. Ход среднегодовых характеристик климата и речного стока в пос. Чульман и с. Чара:

*а* – р. Чульман, *б* – р. Чара;  
 1 – объем речного стока, 2 – суммарные осадки, 3 – среднегодовая температура воздуха.



**Рис. 2.** Ход гидрологических параметров р. Чульман:

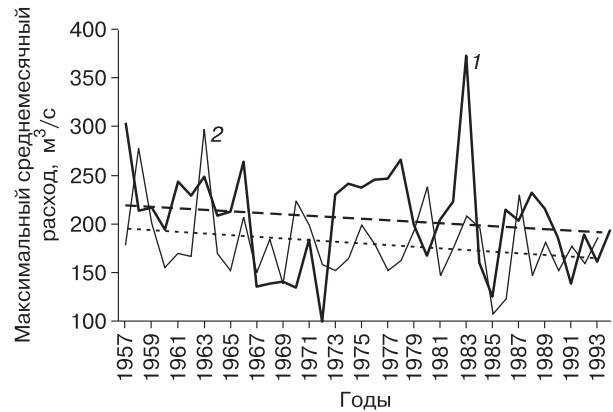
1 – средний речной сток ( $Q_3$ ) за зимний сезон (ноябрь–апрель); 2 – средний речной сток ( $Q_c$ ) за сентябрь; 3 – средние осадки ( $P$ ) за сентябрь; 4 – температура воздуха ( $T$ ) в теплый период года (июнь–сентябрь); 5 – линейные тренды данных параметров.

Анализ максимальных объемов среднемесячного расхода в русле на гидропостах в с. Чара и пос. Чульман показал постепенное снижение этого показателя (рис. 3), в динамике которого в Чаре наблюдались периоды заметного уменьшения (1967–1973 и 1992–1994 гг.).

Отметим, что такая составляющая водного баланса, как потери влаги на испарение, не демонстрировала явных тенденций изменения за период наблюдений, показав некоторое снижение к началу 1970-х гг., скомпенсированное в последующий период [Berezovskaya et al., 2005].

### МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПРИНИМАЕМЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Авторы опирались на предположение, что главной причиной неоднозначной реакции стока на изменения количества атмосферных осадков является динамика подземного (подмерзлотного) стока, обусловленная меняющимися геокриологическими условиями на участках питания подземных вод. Для оценки степени влияния геокриологических условий на характеристики речного стока использовался балансовый метод. В уравнении месячного водного баланса учитывались объемы воды, поступающей от таяния снежного по-



**Рис. 3.** Изменения максимального среднемесячного расхода в русле на гидропостах в с. Чара (1) и пос. Чульман (2).

Штриховые линии – линейные тренды соответствующих величин.

крова, количество атмосферных осадков, количество воды, поступающее или блокирующееся в наледях и ледниках, суммарное испарение с поверхности водосбора, потери воды за счет регионального стока подземных вод, количество воды, приходящей в результате конденсации влаги в деятельном слое.

Для бассейна р. Чульман водосбор был разделен на плоскогорную (40 % площади) и горную (60 %) части. В пределах плоскогорной части (Чульманская впадина) ТМП распространены на 69 % площади территории и располагаются в средних и нижних частях склонов (оценка выполнена с учетом карт, подготовленных на кафедре мерзлотоведения геологического факультета МГУ в 1976 г.). В пределах Станового хребта ТМП имеют практически сплошное распространение (97 % площади территории). Климатические данные взяты по метеостанции Чульман, при этом было принято, что количество осадков в пределах Станового хребта в 1,5 раза больше, чем на территории Чульманской впадины. Интенсивность осадков не рассматривалась. Авторы исходили из представлений, что атмосферные осадки стекают с мерзлых склонов в долину почти без задержки, в текущем месяце, а с территории водоразделов осадки переходят в подземный сток и далее по зонам повышенной тектонической и криогенной трещиноватости поступают в русла рек в месяце, следующем за текущим. Это установлено по данным гидрогеологических наблюдений, указывающим на то обстоятельство, что период запаздывания волны напором подземных вод от водоразделов к долинам составляет около месяца. Авторы не располагали достаточным количеством данных, чтобы воспользоваться подходом, описывающим характер спада паводковых вод в виде экспонен-

циального уравнения [Гидрология..., 1988; Природные..., 2001].

Принималось также, что грунтовый и подземный сток в пределах Станового хребта разгружается в русла до выхода р. Чульман в мезозойскую впадину. Считалось, что снегопады начинаются в октябре, 10 % объема снега тает в апреле, 70 % в мае, а 20 % в июне. Предполагалось, что талая снеговая вода стекает так же, как и жидкие осадки. При этом не учитывалось вторичное льдообразование в деятельном слое на водоразделах. Не учитывалась также разница объема осадков, выпадающих в долине и на водоразделах в пределах каждого участка. Испарение в зимнее время считалось нулевым, а летом назначалось по климатическому атласу СССР: с апреля по октябрь 15, 30, 50, 60, 50, 35, 10 мм соответственно [Южная Якутия, 1975; Verezovskaya et al., 2005]. Испарение с поверхности водных объектов в силу их малых площадей не учитывалось. Наледный сток в Чульманской впадине был принят 255 л/с, а в пределах Станового хребта – 1500 л/с (данные З.Г. Устиновой, А.Г. Топчиева, А.В. Гаврилова за период 1965–1976 гг.). Предполагалось, что наледный лед полностью тает в течение лета. Модуль регионального подземного стока принят постоянным в течение года и равен  $2,3 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  [Южная Якутия, 1975]. Для анализа был определен 1990 год, исходя из схожести климатических условий 1989 и 1990 гг., что позволило минимизировать эффект “памяти” речного бассейна.

Испарение в Северном Забайкалье принято по данным М.К. Гавриловой [1967] с округлением величин. Объем наледей в Чаре определен в 20 млн  $\text{м}^3$  [Еникеев и др., 1985; Шестернёв, Верхотуров, 2006].

По результатам расчета месячного водного баланса для замыкающего створа строился годовой гидрограф стока и исследовалось влияние изменений геокриологических условий на форму этого гидрографа. При расчете изменялась площадь таликовых зон, через которые происходит пополнение подземных вод за счет инфильтрации осадков и талых вод. После этого расчетный гидрограф перестраивался и сравнивался с фактическим.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

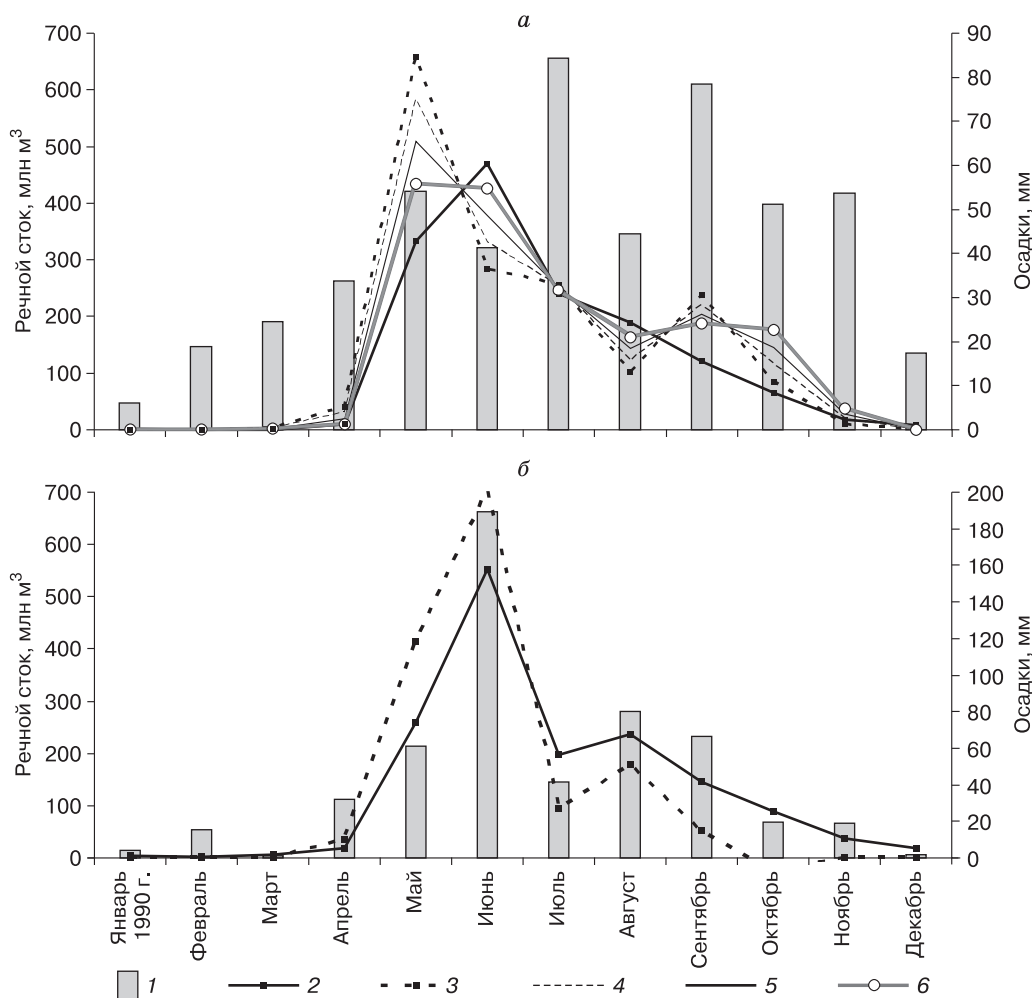
Реконструированный водный баланс за 1990 г. позволил построить расчетные гидрографы ежемесячных сумм речного стока для створов Чульмана и Чары (рис. 4). В Чульмане расчетный гидрограф демонстрирует два принципиальных отличия от наблюдаемого: более резкий и ранний пик весеннего половодья и наличие второго пика руслового расхода в сентябре (см. рис. 4, а). Это, в принципе, согласуется с ходом выпадения осадков, но в ре-

альности в 1990 г. этого не наблюдалось (в другие годы второй пик речного расхода летом был редок). К возможным источникам данной ошибки следует отнести недостаточные сведения об объемах и свойствах подземных коллекторов, способных принять избыток инфильтрующихся атмосферных вод, весьма приближенную оценку величины суммарного испарения, а также неучет доли талой воды, фиксирующейся в виде гольцового льда в деятельном слое в мае и постепенно пополняющей подземные воды при оттаивании этого льда в течение лета.

В Чаре влияния вышеуказанных допущений не наблюдается, хотя в этом случае объемы весеннего паводка также оказались несколько переоцененными, а августовского пика и осеннего стока, наоборот, недооцененными (см. рис. 4, б). В условиях сплошного по площади распространения ТМП доля подземного стока в бассейне р. Чары представляется существенно меньшей по сравнению с Чульманской впадиной, что заметно уменьшает ошибку вычислений водного баланса.

Влияние изменяющихся геокриологических условий исследовалось балансовым методом только для бассейна р. Чульман, поскольку при повышении среднегодовой температуры горных пород даже на  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$  площади таликов в Чаре изменятся незначительно из-за общего низкого фона температур (от  $-7,0$  до  $-1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и водообильности таликовых зон, приуроченных к толщам флювиогляциальных и аллювиальных отложений грубого состава. В Чульманской впадине при увеличении площади таликовых зон питания подземных вод на 10 % пиковые расчетные расходы весеннего и летнего паводков становятся примерно на 15 % меньше. Последовательное увеличение площади таликов на 30 % в итоге приводит к снижению расчетных расходов весеннего паводка на 38 % и к растягиванию срока этого паводка до конца июня. Пик летнего паводка при этом не исчезает, но тоже сглаживается, растягиваясь до ноября. Заметим, что в целом гидрограф сглаживается за счет снижения максимумов и повышения минимумов среднемесячных значений стока.

Следует отметить, что сведения о распределении мерзлых и талых участков взяты по геокриологической карте 1976 г. Мы не знаем достоверно, как изменились площади таликов в настоящее время, но можем предположить, что эта площадь увеличилась вследствие потепления климата. Смягчение климатических условий на территории с прерывистым характером распространения ТМП приводит не только к росту площадей питания подземных вод, но и к увеличению емкости массивов горных пород за счет сокращения объемов мерзлых пород. Это не имеет большого значения вблизи южной границы криолитозоны,



**Рис. 4. Сравнение фактического и расчетных гидрографов речного стока за 1990 г. на гидропостах пос. Чульман (а) и с. Чара (б):**

1 – жидкий эквивалент осадков; речной сток: 2 – фактический, 3 – вычисленный, 4 – вычисленный речной сток при увеличении площади таликов на 10 %, 5 – на 20 %, 6 – на 30 %.

где указанное изменение выражается незначительными колебаниями мощностей ТМП в их относительном выражении. Однако в суровых геокриологических условиях (например, в Северном Забайкалье), где объем талых водных коллекторов существенно меньше объема мерзлых массивов, изменение геокриологических условий должно влиять не столько на изменение доли подземного стока в суммарном стоке с территории, сколько на режим наледообразования. При потеплении климата доля речного стока за счет таяния ледников будет расти, а доля наледного стока, наоборот, уменьшаться. Это обусловлено, с одной стороны, уменьшением дебита родников (все большая доля стока уходит по подрусовым таликам, объем которых растет), с другой стороны,

все более ранним наступлением весны и потеплением зимы, что приводит к ускорению стаивания наледей и к уменьшению их объемов. Эти тенденции наблюдаются в Северном Забайкалье, где летующие наледы ныне практически исчезли [Шестернёв, Верхотуров, 2006].

Остается необъясненным отсутствие в 1990 г. второго максимума речного стока, обусловленного сентябрьскими осадками (см. рис. 4, а). Возможно, что величина 100–120 млн м<sup>3</sup> соответствует объему подрусовых таликов, поглощающих воду пиковых осадков. В этом случае балансовый метод имеет перспективы для изучения динамики объема таликов в те годы, когда существует возможность наблюдать паводки, не связанные со снеготаянием.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование показало, что расчетная реакция речного стока на климатические изменения различна в районах сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. При сплошном распространении ТМП в условиях горного рельефа потепление климата существенно не изменяет значений расчетных характеристик подземного стока, но отражается на режиме наледеобразования.

В условиях прерывистого распространения ТМП уменьшение площадей распространения последних приводит к уменьшению пиков весенних и летних паводков и растягиванию их во времени за счет увеличения объема подземных коллекторов, отбирающих часть влаги, поступающей с атмосферными осадками, снеготаянием и конденсацией. В Чульманской впадине при увеличении площади таликовых зон питания подземных вод на 10 % пиковые расчетные расходы весеннего и летнего паводков становятся меньше примерно на 15 %.

Динамика геокриологических условий в связи с климатическими изменениями более интенсивна вблизи южных границ криолитозоны, что объясняет и большую изменчивость показателей стока в этих районах.

Авторы выражают благодарность С.Л. Березовской и М.В. Касымской за эффективную помощь в обработке и анализе данных.

Работа выполнена при поддержке гранта NASA "Текущие климатические изменения в Восточной Сибири и их воздействие на мерзлотные ландшафты, динамику экосистем и гидрологические режимы" (2006 г.) и РФФИ (гранты № 06-05-64959а, 08-05-00421-а).

## Литература

**Всеволожский В., Куринова Т.** Водный баланс зоны интенсивного водообмена в районах с южным типом криолитозоны // Геокриологические и гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. М., Наука, 1989, с. 13–23.

**Гаврилова М.К.** Микроклиматический и тепловой режим земной поверхности и грунтов в Чарской котловине // Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. М., Наука, 1967, с. 148–161.

**Гидрология** и гидротехнические сооружения / Под ред. Г.Н. Смирнова. М., Высш. шк., 1988, 472 с.

**Еникеев Ф.И., Дудецкая Т.И., Старашко В.Е. и др.** Гидрогеологические условия площади листов О-50-XXVIII, О-50-XXIX, О-50-XXX, О-50-XXXIII, О-50-XXXIV. Чита, ПГО "Читагеология", 1985, 117 с.

**Михайлов В.М.** Пойменные талики Северо-Востока России: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Якутск, 2005, 42 с.

**Павлов А.В., Малкова Г.В.** Современные изменения климата на Севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2005, 54 с.

**Природные опасности России.** Гидрометеорологические опасности. М., Изд. фирма "Крук", 2001, т. 5, 296 с.

**Романовский Н.Н., Булдович С.Н., Типенко Г.С. и др.** Оценка влияния климатических изменений на поверхностный сток с помощью моделирования теплового взаимодействия многолетнемерзлых пород и подземных вод (на примере верхней части водосборного бассейна р. Лены) // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 1, с. 55–64.

**Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Романовский В.Е., Романовский Н.Н.** Динамика мощности мерзлых толщ в горах под влиянием длиннопериодных колебаний климата (результаты численного моделирования для условий северной геокриологической зоны) // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 2, с. 15–22.

**Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Романовский В.Е. и др.** Влияние горного рельефа и вертикальной геокриологической поясности на эволюцию мощностей многолетнемерзлых толщ Южной Якутии // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 2, с. 33–42.

**Фотиев С.М.** Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. М., Наука, 1965, 231 с.

**Фотиев С.М.** Проблема взаимодействия подземных вод и мерзлых толщ в различных типах гидрогеологических структур на территории СССР // Материалы VIII Всесоюз. междувед. совещания по геокриологии. Якутск, Кн. изд-во, 1966, вып. 2, с. 38–48.

**Шестернёв Д.М., Верхотуров А.Г.** Наледи Забайкалья. Чита, Чит. ун-т, 2006, 213 с.

**Южная Якутия** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 444 с.

**Berezovskaya S., Yang D., Hinzman L.** Long-term annual water balance analysis of the Lena River // Global and Planet. Change, 2005, vol. 48, p. 84–95.

**The Hydrologic Cycle and its role in Arctic and global environmental change** // A Rationale and Strategy for Synthesis Study. Santa Barbara, 2000, 84 p. (Rep. / NSF-ARCSS Hydrol. Workshop).

**Woo M.-K., Kane D.L., Carey S.K., Yang D.** Progress in permafrost hydrology in the new millennium // Permafrost and Periglacial Processes, 2008, vol. 19, No. 2, p. 237–254.

*Поступила в редакцию  
26 февраля 2009 г.*