

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.168

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В БАССЕЙНЕ р. ЛЕНЫ¹

© 2012 г. Р. Г. Джамалов, Г. Н. Кричевец, Т. И. Сафронова

Институт водных проблем РАН

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 14.04.2011 г.

Исследованы влияние климата на современные условия формирования и происходящие изменения режимов годового и меженного стока бассейнов рек Восточной Сибири. Показано, что заметное потепление климата в Восточной Сибири в течение последних десятилетий сопровождается не только ростом температуры воздуха и некоторым увеличением атмосферных осадков, но и существенным изменением годовых и сезонных величин речного и подземного стока. На основании гидрометеоданных проведен анализ изменения среднегодового и среднемеженного стока за весь период наблюдений, 1940–1969 и 1970–2005 гг. Построены графики, диаграммы, таблицы по наиболее представительным створам. Проведено районирование территории по условиям формирования стока и выполнена переоценка общих водных ресурсов и естественных ресурсов подземных вод за 1970–2005 гг. с построением карт в программе ArcMap.

Ключевые слова: нестационарный климат, водные ресурсы, подземные воды, меженный сток, годовой сток, водный дефицит, многолетнемерзлые породы, эмиссия метана.

Изучение современных пространственно-временных особенностей формирования речного стока как элемента водного баланса суши дает возможность рассмотреть изменения режима годового и меженного стока рек в различных природно-климатических зонах территории России в связи с глобальными изменениями климата и антропогенным воздействием (реки Волга, Дон, Кубань, Лена, Обь, Енисей и др.). Анализ временных рядов стоковых и метеорологических характеристик проведен для трех различных периодов: с начала наблюдений по 2005 г.; с 1939 по 1969 г.; с 1970 по 2005 г. или до конца наблюдений. Два последних периода сопоставимы по длительности, что позволяет сравнивать между собой среднегодовые и сезонные характеристики за эти близкие по длительности интервалы времени для более объективной оценки выявляемых изменений. Изучение пространственно-временных особенностей формирования водных ресурсов, включая подземную составляющую общего речного стока, направлено на выявление современных закономерностей распределения поверхностных и подземных вод при существующих климатических условиях и прогнозируемых изменениях климата.

Внутригодовое распределение стока чувствительно к изменениям как атмосферных осадков,

так и температуры воздуха. При этом важны не только величина этих изменений, но и сезоны (месяцы) их проявлений. Сток рек внутри года за последние десятилетия имеет более равномерное распределение: максимальный половодный сток ниже, а меженный (подземный) и минимальный выше, чем при климатических условиях середины XX в.

При анализе режима стока рек использован расчет стоковых характеристик за многолетний период и по сезонам года, что позволяет определить расчетные характеристики изменения годового, меженного (подземного) и минимального стока рек при различных вариациях климата. Для оценки направленности и масштаба изменения величин стока особый интерес представляет выявление трендов во временном распределении его генетических составляющих. Так, меженные расходы р. Лены в течение холодного периода гидрологического года наиболее полно отражают вариации подземной составляющей общего речного стока. Это дает основание рассчитать естественные ресурсы подземных вод (обеспеченный питанием расход подземного потока) по данным меженных и минимальных расходов рек и оценить масштабы и направленность их изменений за последние годы в связи с климатическими вариациями. Угловые коэффициенты линейных трендов изменяются от 0.5 до 3.0 м³/(с год) и более. При этом анализ стоковых характеристик свидетельствует, что величины угловых коэффициентов обычно

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 11-05-00467, 09-05-92001-ННС), НОЦ (госконтракт 02.740.11.0336).

возрастают за последние десятилетия, с 1970–1980-х гг. для многих гидрометрических постов р. Лены и других рек Восточной Сибири с многолетними рядами наблюдений [4, 6].

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМА ПОВЕРХНОСТНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТОКА

Изменения атмосферных осадков и температуры воздуха на территории России приведены по данным наблюдений с 1936 по 2010 г., что в совокупности характеризует изменения климата с учетом антропогенных воздействий [7]. К 2000 г. среднегодовая температура воздуха планеты выросла на $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$. Самое теплое десятилетие в России – 1990–2000 гг. с наиболее высокими температурами в 2007 г. (аномалия температуры $+2.06^\circ\text{C}$), за ним – 1995 (аномалия $+2.04^\circ\text{C}$) и 2008 (аномалия $+1.88^\circ\text{C}$). Средняя скорость потепления в 1976–2010 гг. для территории России составила $0.47^\circ\text{C}/10$ лет, в Восточной Сибири и Прибайкалье-Забайкалье – $0.52^\circ\text{C}/10$ лет. В рекордном 2007 г. положительная аномалия составила 2.1°C . В сравнительно холодном 2009 г. среднегодовая температура воздуха на территории России превысила “норму” 1961–1990 гг. на 0.55°C . Несмотря на понижение температуры в 2009 г., существенных изменений в ее климатических тенденциях за период 1976–2010 гг. не произошло [7].

В течение последних 30-ти лет на всей территории России происходило потепление. 2009 г. оказался менее теплым (аномалия $+0.55^\circ\text{C}$) по сравнению с 2008 г. (аномалия $+1.88^\circ\text{C}$) и практически со всеми годами XXI в. (кроме 2006 г.). Однако для Восточной Сибири 2009 г. был в числе десяти самых теплых лет этого периода. Обширные области положительных аномалий отмечались в сентябре, аномально холодными месяцами оказались февраль и декабрь [7]. Наибольшая скорость потепления зимой отмечается в Якутии, на юге Красноярского края и в Прибайкалье – зимой и весной, на Чукотке и в Магаданской области – весной и осенью. Тенденция к похолоданию на территории России сохраняется лишь в зимний период в северо-восточном регионе (Чукотка, Магаданская область, восточные районы Якутии). При этом в верхнем и нижнем течении Лены скорость изменения средних годовых температур воздуха выше, чем в среднем течении [7].

Ход температуры теплового периода не имеет направленных изменений за весь период наблюдений. В то же время температуры холодного периода по всем метеостанциям имеют статистически обоснованный рост с ярко выраженным линейным трендом. Однако в 2010 г. наметились некоторые признаки замедления темпов потепления,

что требует дальнейшего уточнения. Среднегодовая температура характеризуется падением за 1935–1970 гг. и ростом за 1970–2007 гг. почти на всех метеостанциях Восточной Сибири (рис. 1).

В целом на территории России тренды в ходе атмосферных осадков выражены значительно слабее, чем в ходе температуры, но они указывают на увеличение количества осадков за последние 30 лет. Линейные тренды в ходе осадков за 1976–2010 гг. свидетельствуют о слабом увеличении осадков практически на всей территории России. Особо следует отметить, что лето 2010 г. в целом для России попадает в число восьми самых сухих лет (после 1938 и 1972 гг.). В то же время, годовые суммы осадков в 2010 г. превышали норму в Приамурье, Приморье. Однако на северо-востоке Сибири проявляется слабая тенденция к уменьшению осадков зимнего и летнего сезонов. В бассейне р. Лены наиболее существенно проявляется рост летних и осенних осадков (2.2 – 1.5 мм/мес/10 лет). В Восточной Сибири в целом наблюдается увеличение весенних осадков и убывание зимних и летних, в Прибайкалье – рост зимних и весенних осадков [7].

Изменение количества атмосферных осадков в бассейне Лены происходит крайне неравномерно и разнонаправлено. В одних его частях суммы среднегодовых осадков за 1970–2009 гг. имеют тенденции к увеличению, в других – к уменьшению, что обусловлено климатическими, географическими и ландшафтными условиями конкретного района этой огромной территории (рис. 2).

Характерная особенность территории Восточной Сибири – практически повсеместное распространение многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП в северных и центральных районах достигает 200 – 500 м и более. В южных частях Забайкалья (бассейн верхней Лены) мощность мерзлых пород уменьшается, появляются участки переходной и островной мерзлоты с таликами. При сплошном распространении ММП доля таликов не превышает 5% всей территории, в зоне переходной мерзлоты – 50, а в островной мерзлой зоне – $>80\%$ [11, 12]. Наиболее распространены подрусовые и подозерные талики, которые формируются под пресными водотоками и водоемами и расчленяют сплошную мерзлую зону на отдельные участки. В пределах сплошного развития ММП их температура обычно ниже -2.5°C . В области прерывистого распространения мерзлой зоны ее мощность снижается до 50 м, температура постепенно возрастает до -1°C . В пределах островной мерзлой зоны мощность ММП обычно меньше 50 м при их температуре около и выше -1°C .

Мощность сезонно-талого (деятельного) слоя (СТС) изменяется от 0.5 до 5.0 м и зависит от характера теплообмена грунтов с атмосферой, что

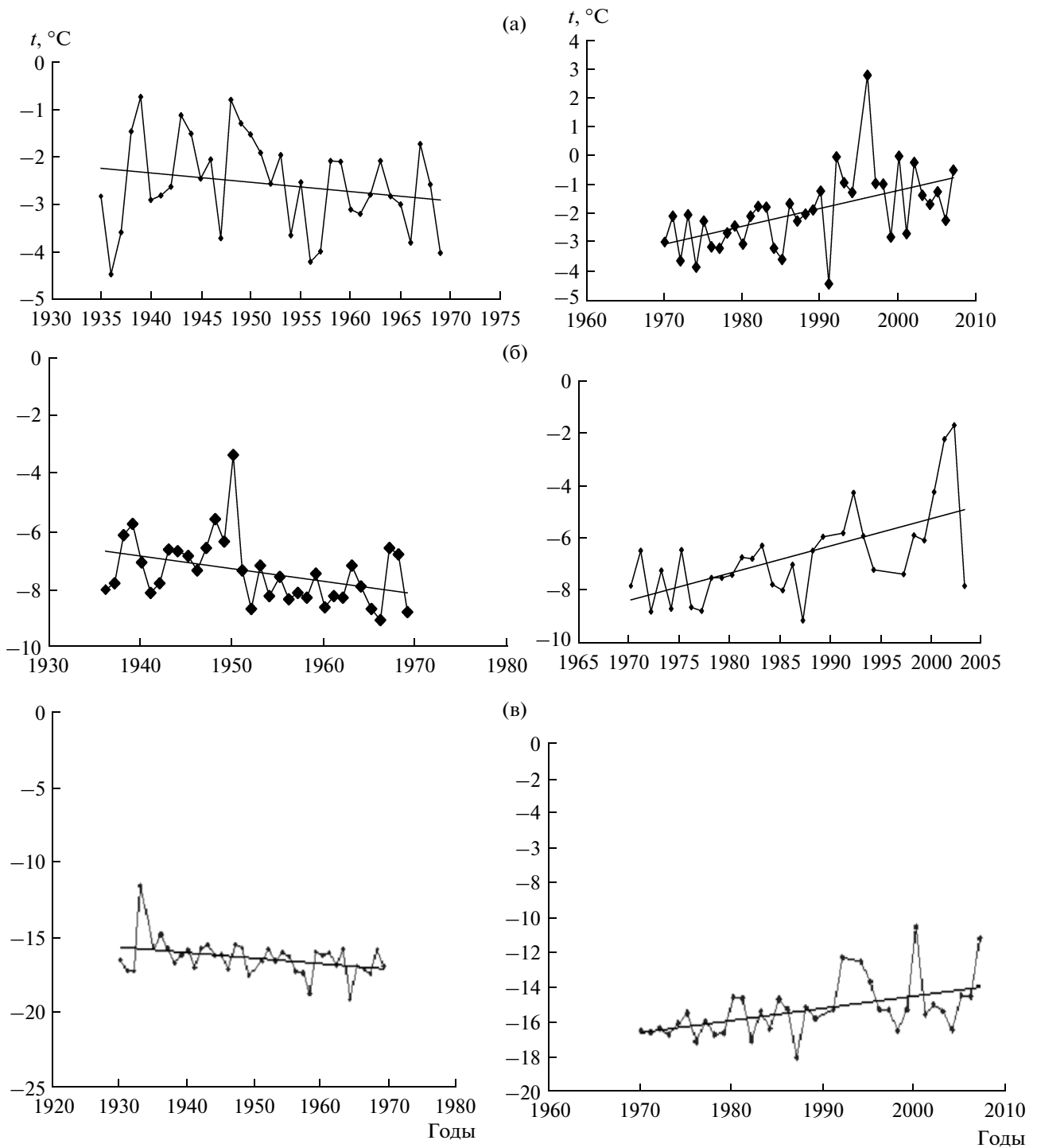


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры в бассейнах Лены и Индигирки за 1935–1970 и 1970–2007 гг. а – р. Конда–ст. Элкисер; б – р. Витим–ст. Калахан; в – р. Индигирка–Индигирский г/п.

определяется широтой местности, физико-географической и геокриологической обстановкой на конкретной территории. С другой стороны, процессы летнего оттаивания грунтов оказывают непосредственное влияние на формирование поверхностных вод, так как мощность талого слоя,

его пористость и фильтрационные свойства определяют характер дождевых паводков и величину влагозапасов на водосборе. СТС способствует частичному или полному перераспределению влаги по сезонам года, определяет величину влагозапасов на водосборе, и таким образом дея-

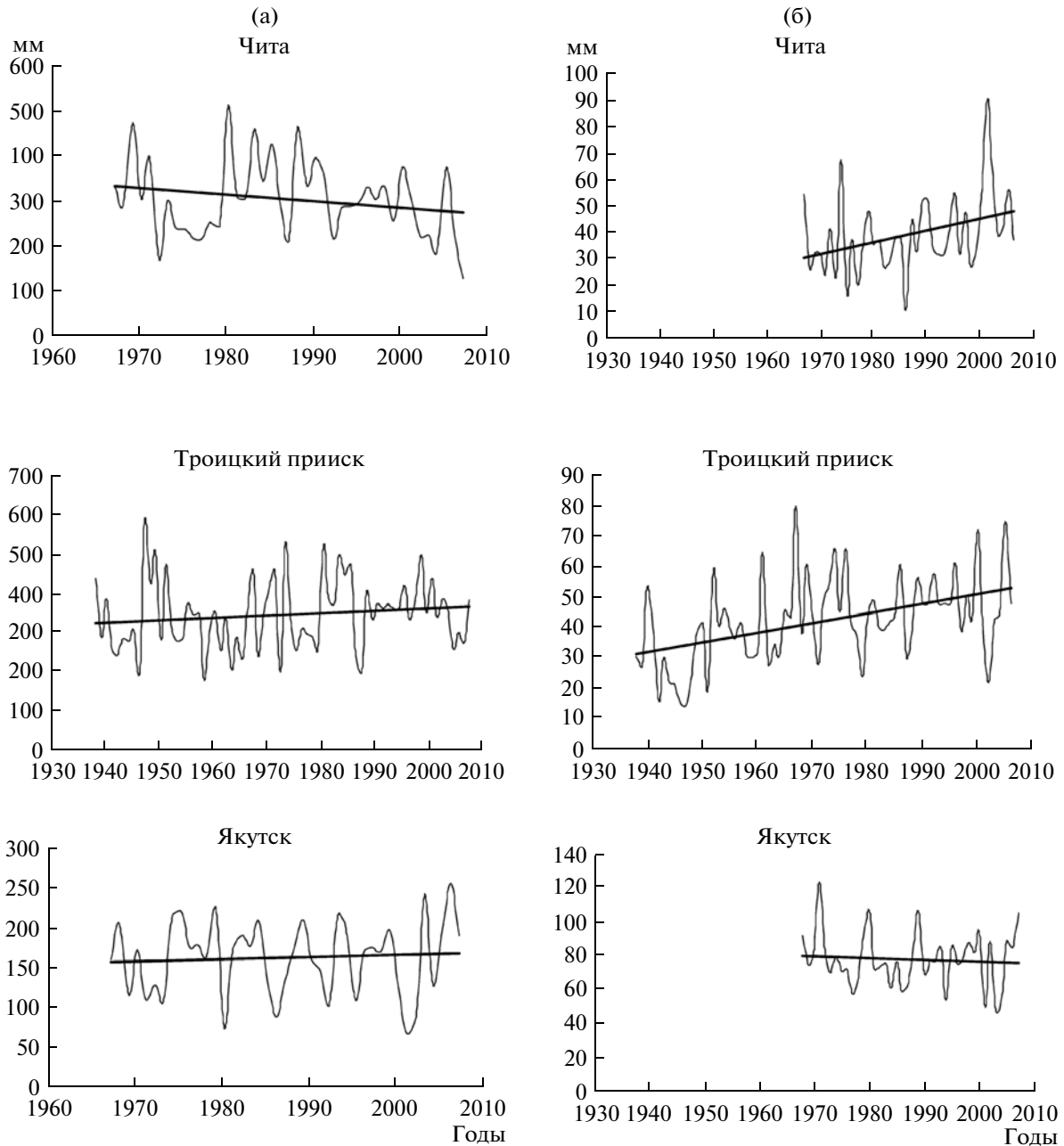


Рис. 2. Изменение сумм осадков, мм, за теплый (а) – (апрель–октябрь) и холодный (б) – (ноябрь–март) периоды за 1970–2007 гг. для бассейна р. Лена.

тельный слой служит сезонно-мерзлотным регулятором стока рек и питания подземных вод высоких широт.

Анализ данных с середины 1990-х гг. свидетельствует о заметном увеличении мощности СТС в начале XXI в. на большинстве наблюдательных площадок. Однако из-за небольших величин СТС его изменения в целом слабые. Но положительный тренд изменения мощности СТС все же прослеживается на всех площадках за весь период наблюдения. Даже в 2009 г. мощность СТС

на 13% превышала среднее ее значение за предыдущее десятилетие. Данные современных мониторинговых наблюдений и анализ результатов геотермических расчетов свидетельствуют о деградации криолитозоны (повышение температуры ММП, уменьшение их площади, увеличение глубины сезонного протаивания) за последние 25 лет. Увеличение температуры воздуха за последние 30 лет способствует более глубокому сезонному протаиванию, в результате чего над ММП образуется мощный талый слой и происхо-

дит постепенный отрыв мерзлых толщ ММП от поверхности земли. Развитие такого процесса во времени приведет к сокращению площади распространения приповерхностной многолетней мерзлоты при сохранении на некоторой глубине ММП, характерных для данной широты [7].

В высоких широтах, на значительных площадях Лено-Вилуйской низменности и устьевых участках рек Колымы и Индигирки, часто встречаются на небольшой глубине погребенные льды мощностью до 10 м и более, что в значительной степени определяет теплофизические свойства мерзлых горных пород. Подземные льды служат одним из ведущих источников формирования подземного и поверхностного стока для значительной части рассматриваемой территории. Эти льды фактически выводят из круговорота на годы и десятилетия подземные или поверхностные воды, которые при более благоприятных средне-голетних климатических условиях вновь принимают участие в гидрологическом цикле. Подобное влияние подземных льдов отчетливо проявляется в возникновении многочисленных термокарстовых и других типов озер, формирование которых на первых этапах их развития обусловлено таянием жильных льдов. Развитие термокарста и эрозия берегов уже сейчас в ряде мест составляет 10 м/год и более.

Непосредственное влияние на формирование подземных вод оказывают так называемые повторножильные и инъекционные льды, которые образуют скопления в толще рыхлых аллювиальных и водно-ледниковых отложений северных равнин и Центральнойкутской низменности. Массивные клинья льдов достигают высоты более 60 м и нескольких метров в поперечнике. Ледяные тела пересекаются и образуют в плане полигональную решетку, пространство между сторонами которой сложено сильно льдистыми торфяно-суглинистыми отложениями. При этом жилы чистого льда занимают до 70% площади. Древние и современные мощные льды распространяются далеко на юг, вплоть до 56° с.ш. [11, 12]. По существующим оценкам запасы подземных льдов криолитозоны России составляют 19 тыс. км³, что позволяет назвать мерзлую зону "подземным оледенением".

Процесс вытаивания льдов может продолжаться в течение нескольких лет как своеобразная цепная реакция, при которой таяние захватывает все новые и новые ледяные тела. Не только повышение среднегодовой температуры, но и деятельность человека приводит к изменениям условий теплооборотов на поверхности земли и сопровождается вытаиванием подземных льдов. В таких случаях тающие подземные льды представляют собой существенный дополнительный источник питания подземных и поверхностных вод.

Существует несколько вариантов прогнозов изменения границ распространения криолитозоны России к середине XXI в. В соответствии с модельными расчетами температура поверхности грунтов повысится на 0.9–2.3°C, а глубина сезонного протаивания увеличится на 15–30%. С учетом полного и частичного оттаивания ММП расчетная полоса деградации мерзлоты на северо-востоке Европейской территории России достигнет ширины 50–200, в Западной Сибири – 800 и в Восточной Сибири – 1500 км. Существенно сократятся, но полностью не исчезнут острова и массивы ММП в горах Забайкалья, юга Дальнего Востока и на Камчатке.

В результате таяния ММП увеличится количество поступающих в Ледовитый океан пресных вод. Сейчас этот прирост составляет 7% по сравнению с 1930-ми гг. По прогнозным оценкам дальнейший рост объема поступления пресных вод в океан к 2100 г. составит 28%. Около половины этого прироста связано с речным стоком, а остальная часть выпадает в виде атмосферных осадков.

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГОДОВОГО И МЕЖЕННОГО СТОКА РЕК ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Особенности изменений годового и межennaleго стока рек Восточной Сибири анализируются в основном на примере бассейна р. Лены. Лена – одна из величайших рек мира. В России по длине и площади водосбора она занимает соответственно второе и третье место. Каждая из 13 других рассмотренных рек имеет длину более 1000 км (Ханганга, Оленек, Витим, Олекма, Алдан, Мая, Амга, Вилуй, Марха, Тунг, Яна, Индигирка и Алазея), 62 реки – более 500 км, 845 – более 100 км [3, 14].

Густота речной сети в среднем – 0.5 км/км², в горных районах – более 1.0, а на низменностях она постепенно уменьшается до 0.1 км/км² (Центральнаякутская низменность). Малые водотоки (длиной до 10 км) составляют свыше 94% общего числа, а их длина – 58% суммарного протяжения всех рек района. Глубина вреза речной сети в горных районах – до 600–1000 м (р. Индигирка и др.), на плато и возвышенных равнинах – 150–300 м. Долины больших и средних рек хорошо разработаны, с многочисленными террасами или высотой уступов в скальных породах до 200 м.

В ходе исследований обработаны данные гидрологических наблюдений Росгидромета по 150 гидрометрическим постам бассейна р. Лены и 30 постам бассейна рек Колыма и Анадырь. Из них выбраны наиболее представительные по полноте данных и периоду наблюдения. Для каждого выбранного поста построены графики изменения во времени значений среднегодового, среднеме-

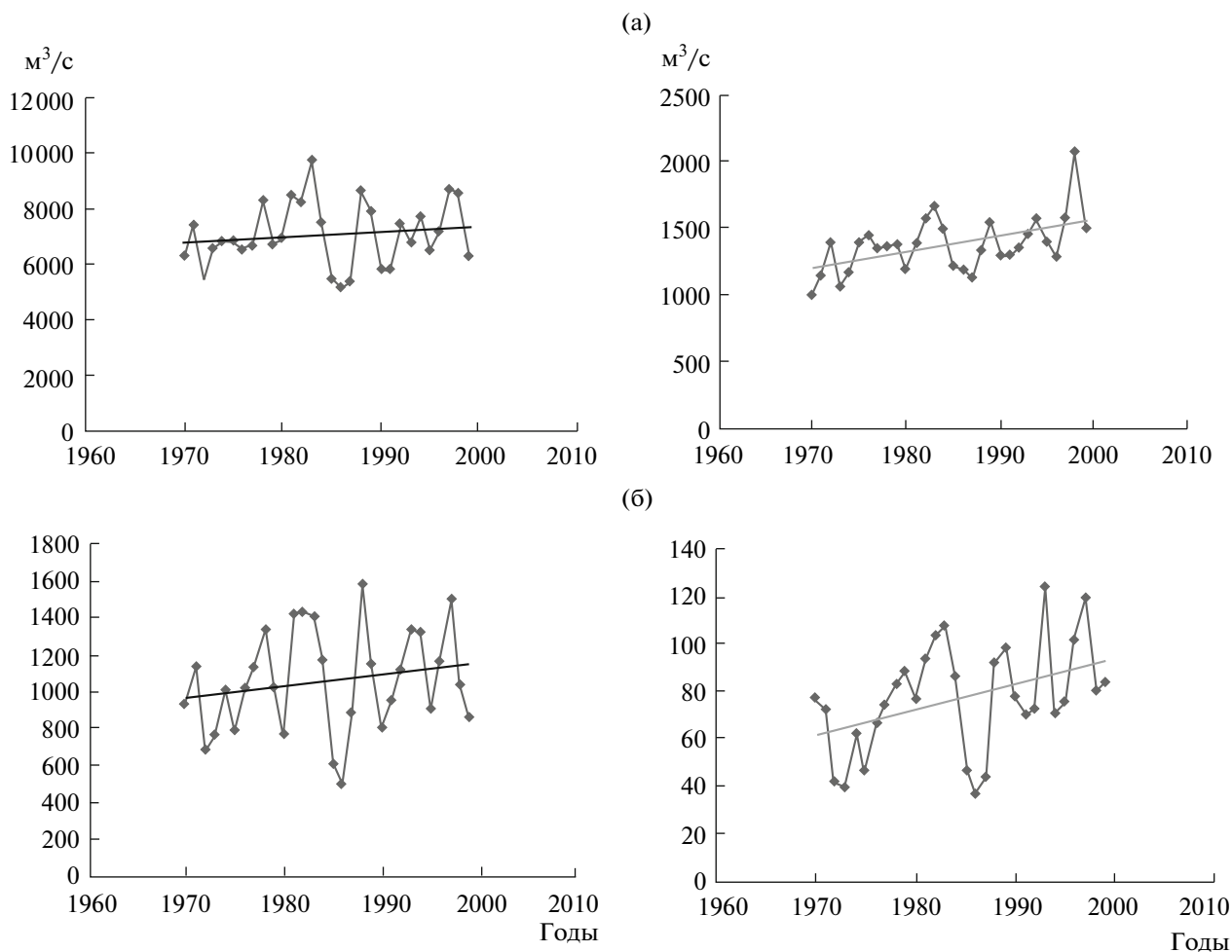


Рис. 3. Изменение за 1970–1999 гг. среднегодового (слева) и среднемесячного (справа) стока, м³/с, на реках Лена (створ Солянка) (а) и Олекма (створ Куду-Кель) (б).

женного и минимального стока, а также графики и гистограммы отклонений этих величин стока от средних их значений за выбранный период наблюдений.

В качестве меженного стока рек Восточной Сибири принят зимний сток с ноября по март, когда реки покрыты льдом и в их питании принимают участие только подземные воды. Это дает основание по данным меженных расходов рек оценить масштабы и направленность изменений подземной и минимальной составляющих общего речного стока за последние годы в связи с климатическими вариациями.

На построенных графиках выделены линейные тренды изменения стока рек за весь период наблюдений (30–80 лет) и за последний период 30 лет, который в гидрологии и климатологии рассматривается в качестве представительного. В результате установлено, что в бассейне Лены из 75 наиболее представительных створов за весь период наблюдений происходит увеличение среднего-

дового стока на 57 створах и среднемесячного — на 59. Если же рассматривать 30-летний период наблюдений с наиболее существенным изменением климатических характеристик (с 1970 по 2007 г.), то увеличение среднегодового стока наблюдается на 56 створах и среднемесячного — на 64 из тех же 75 рассмотренных. Один из примеров изменения годового и меженного стока в бассейне Лены за указанный период приведен на рис. 3. Следовательно, за последние 30 лет меженный сток увеличивается на большей части территории бассейна Лены (85% створов дают положительный линейный тренд).

В бассейнах рек Колыма и Анадырь меженный сток имеет положительный линейный тренд за последние 30 лет (1970–2000 гг.) на 15 створах из 20 рассмотренных, а по 17 створам наблюдается положительный линейный тренд среднегодового стока. Однако здесь же встречаются створы, где за период 30 лет наблюдалось резкое увеличение

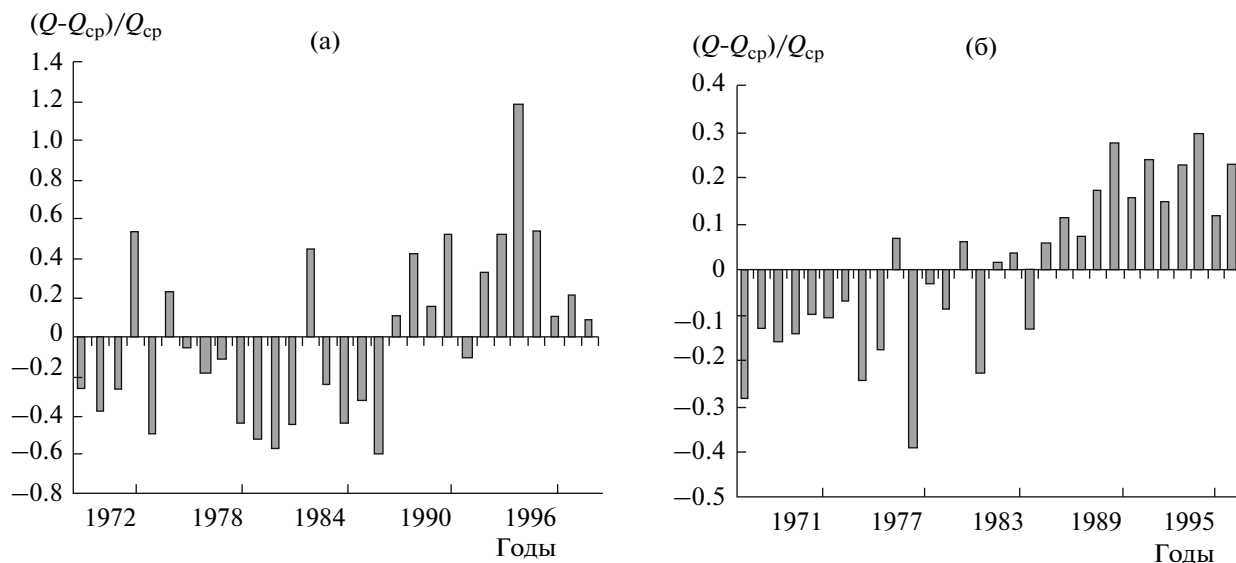


Рис. 4. Относительное отклонение межennaleго стока от его среднего значения за 1970–1999 гг.: а – р. Адыха–створ Юрдук-Кумах), б – р. Лена–створ Крестовское.

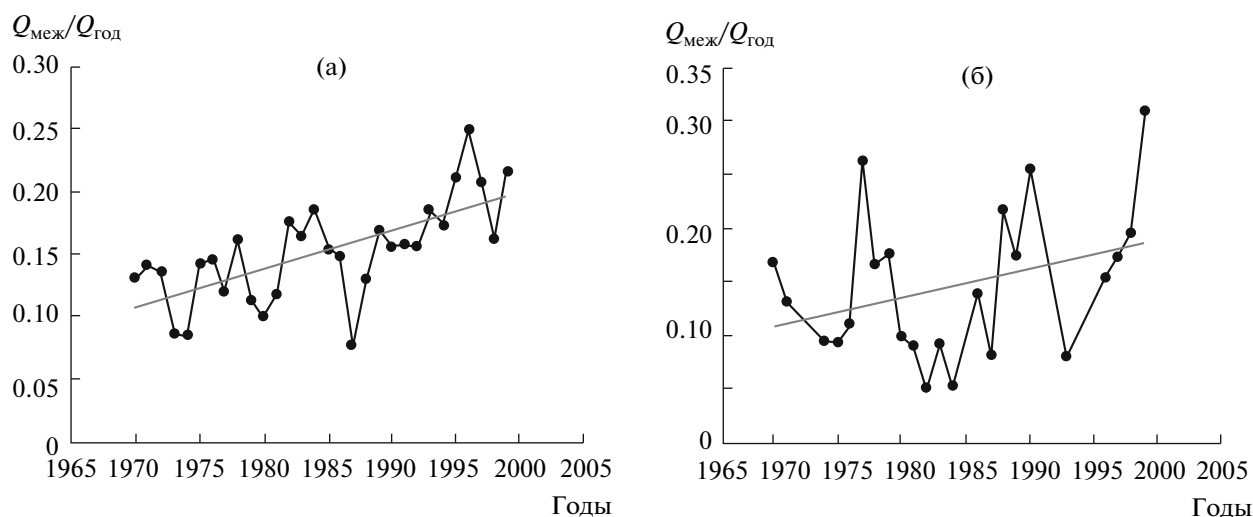


Рис. 5. Изменение доли межennaleго стока в годовом за 30 лет на реках Алдан, створ Суон Тиит (а) и Алазея, створ Аргахтах (б).

среднемежennaleго стока и уменьшение среднего годового стока.

Для всех створов построены нормированные гистограммы отклонения от среднего значения среднего годового и среднемежennaleго стока в долях единицы за выбранный период наблюдений. Гистограммы наглядно показывают, с какого года идет заметное увеличение или уменьшение стока (рис. 4).

Следует подчеркнуть, что за последние десятилетия изменилась доля межennaleго стока в среднегодовом. Почти по всем створам она растет, о чем свидетельствуют тренды изменения доли средне-

межennaleго стока в среднегодовом за 1970–2000 гг. (рис. 5).

РЕГИОНАЛЬНАЯ ПЕРЕОЦЕНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ БАССЕЙНА р. ЛЕНЫ ПО СОСТОЯНИЮ НА 2005 г.

Выполненный анализ изменения межennaleго стока рек Восточной Сибири за весь период наблюдений и особенно за последние 30 лет позволяет провести региональную переоценку годового, межennaleго и минимального стока по речным бассейнам и их частям (общих водных и естественных ресурсов подземных вод с учетом рабо-

Средние значения ресурсов поверхностных и подземных вод бассейна Лены за период 1970–2005 гг.

Река—закрывающий створ	Площадь водосбора, тыс. км ²	Общие водные ресурсы (годовой сток), км ³ /год/л/(с км ²)	Изменение водных ресурсов относительно периода 1940–1969 г., %	Ресурсы подземных вод (меженный сток), км ³ /год/л/(с км ²)	Изменение ресурсов подземных вод относительно периода 1940–1969 г., %	Ресурсы подземных вод 80%-ной обеспеченности (минимальный сток), км ³ /год/л/(с км ²)	Изменение минимальных ресурсов подземных вод относительно периода 1940–1969 г., %
Лена—Кюсюр	2430	548.0/7.0	5	94.4/1.2	30	61.9/0.8	80
Витим—Бодайбо	186	52.5/9.0	15	4.9/0.8	15	2.9/0.5	25
Амга—Теруг	65.4	6.4/3.0	10	1.0/0.5	50	0.7/0.3	50
Алдан—Верхоянский Перевоз	696	193.4/9.0	20	25.6/1.2	60	11.9/0.5	70
Виллой—Хатырык-Хомо	452	50/3.5	5	20.7/1.5	5	15.0/1.0	10

ты [10]). Несмотря на сравнительно небольшое количество атмосферных осадков на большей части региона, их незначительные потери на испарение при суровом климате и широком распространении ММП обуславливают здесь сравнительно высокий поверхностный и подземный сток.

Гидрогеологические структуры Восточной Сибири можно разделить на три типа в соответствии с различным участием развитых здесь водоносных горизонтов в формировании подземного и поверхностного стока. К первому типу относятся структуры активного взаимодействия подземных вод с поверхностными, ко второму — ограниченному, и к третьему — незначительному взаимодействию. При этом основного внимания заслуживают водоносные горизонты верхней части гидрогеологического разреза в зоне прерывистого и островного распространения ММП, активно взаимодействующие с поверхностными водами [12].

В верхнем течении р. Лены, по бассейнам рек Витима, Амги, Алдана, Олекмы величины среднегодового стока за последние 30 лет возросли от 5 до 25% и более (таблица, рис. 6а). Естественные ресурсы подземных вод этого региона (меженный сток) увеличились в среднем на 40%, а в частных водосборах бассейнов Алдана и Амги — до 100% (таблица, рис. 6б), хотя по отдельным частным водосборам верхней Лены (створы Змеиново, Качуг), Витима, Алдана, Амги наблюдается уменьшение ресурсов (среднегодового стока) на 10%. Здесь развиты гидрогеологические структуры с тесным взаимодействием подземных и поверхностных вод. К ним относятся Ангаро-Ленский артезианский бассейн в пределах бассейна р. Ле-

ны, Средненский артезианский бассейн (бассейны рек Средней Лены, Туолбы, Амги, Алдана, Май, Джербы, Ньюи, Пеледуя и др.), Алданское крыло Якутского артезианского бассейна (бассейн нижнего течения рек Олёкмы, Ботомы, верхняя часть бассейна р. Амги, частично Алдана и Лены). Основные водоносные горизонты указанных структур принадлежат к силурийским, ордовикским, кембрийским и верхнепротерозойским отложениям. Водоносные породы представлены преимущественно карбонатными, терригенно-карбонатными и терригенными отложениями с линзами и прослоями гипсов и ангидридов, содержащими пластово-карстовые или трещинно-пластовые воды. Суммарная их мощность — от 300 до 3000 м. Островной характер ММП в сочетании с закарстованностью пород и значительным эрозионным врезом речных долин обеспечивают благоприятные условия инфильтрации атмосферных осадков и активную взаимосвязь подземных и поверхностных вод. Трещинно-пластовые и трещинно-карстовые воды разгружаются в долинах рек Лены, Алдана, Ньюи, Бирюка, Джербы и других, образуя многочисленные источники с дебитами от 0.5 до 200 л/с. Температура подземных вод — от 0.5 до 4°C. Воды из карбонатных пород преимущественно пресные или слабосоленоватые гидрокарбонатно-сульфатные с минерализацией обычно 1–2, местами до 6 г/л, но в соленосных породах воды хлоридно-натриевые до 80 г/л и более.

К структурам с тесным взаимодействием подземных вод с поверхностными относится также гидрогеологическая система Восточно-Сибирских складчатых областей, которая охватывает

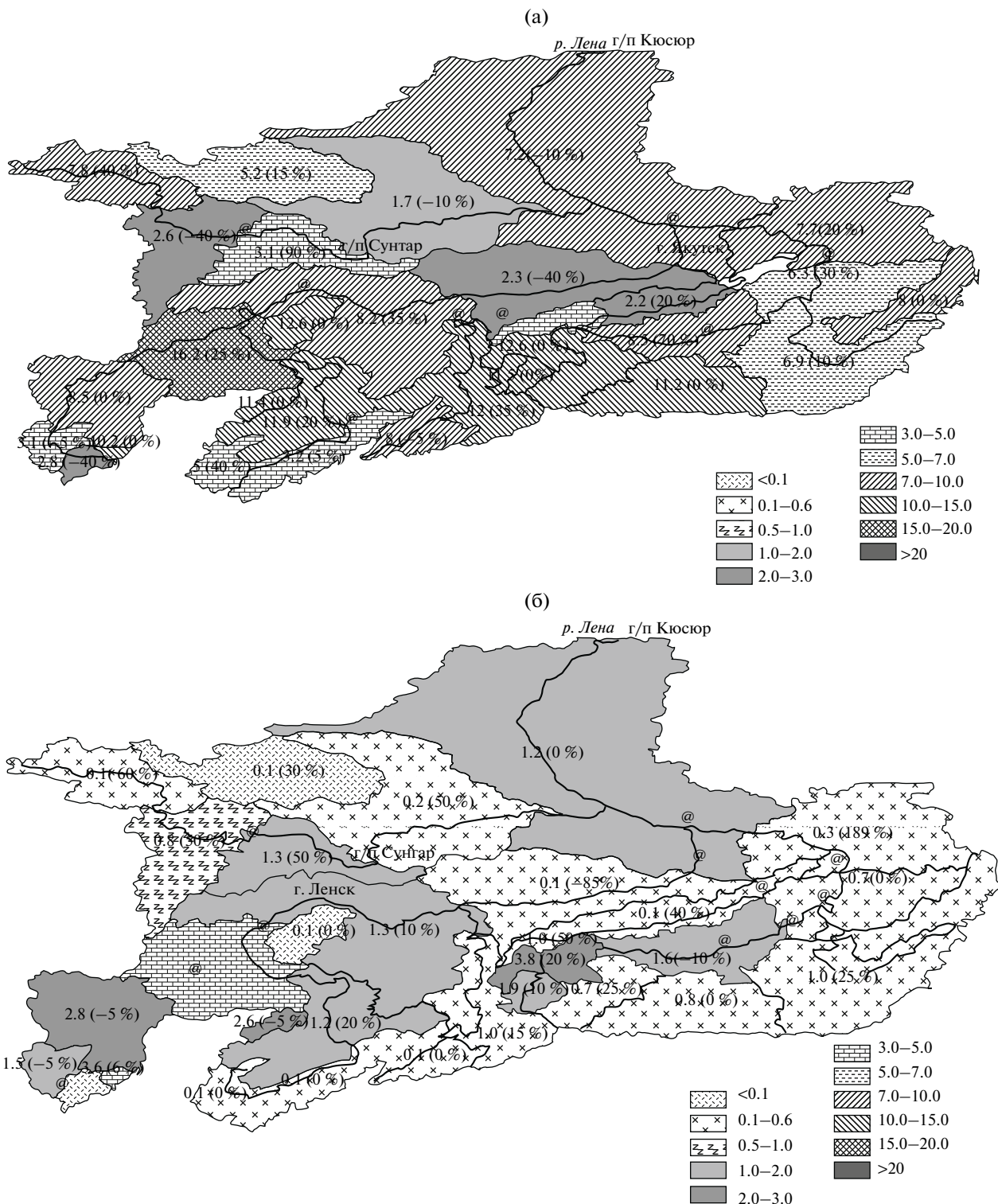


Рис. 6. Карта-схема общего речного (а) и меженного (подземного) стока (б) бассейна Лены по состоянию на 2005 г. (в модулях, л/(с км²), и процентах (в скобках) отклонения современных величин стока от их предыдущих оценок).

южную и юго-западную часть рассматриваемой территории с относящимися к ней частями бассейнов рек Лены, Витима, Чары, Олёкмы, Алдана и включает Алданский и Патомо-Витимский гид-

рогеологические массивы, Байкало-Чарскую и Даурскую гидрогеологические складчатые области. Гидрогеологические массивы и складчатые области на преобладающей площади сложены

кристаллическими и метаморфическими породами с трещинными и трещинно-жильными водами, связанными с зоной выветривания мощностью до 100 м либо с глубокими тектоническими разломами. Субкавальные источники из этих пород имеют дебиты 3–10, групповые – до 300 л/с, образуя зимой наледи и полыньи. Модули родникового стока не превышают 0.3 л/с км². Высокой водообильностью отличаются также четвертичные и мезозойские рыхлые гравийно-галечниковые отложения древних долин гидрогеологических массивов мощностью около 70 м. Удельные дебиты скважин достигают десятков литров в секунду. Воды сульфатно-гидрокарбонатные с минерализацией менее 0.3 г/л.

В среднем течении Лены, включая бассейн Вилюя, среднегодовые величины стока рек испытывают разнонаправленные изменения: сток Вилюя сокращается на 10–40%, а в среднем течении Лены и низовьях Алдана возрастает на 5–20% (таблица, рис. 6а). Подземный сток и, соответственно, естественные ресурсы подземных вод возрастают в среднем на 30, местами до 50% и более по сравнению с 30-летним периодом до 1970 г. (таблица, рис. 6б). Вместе с тем, в этой же части бассейна происходит довольно существенное сокращение меженного стока (до –85%, посты Солянка и Табага). Это связано с широким распространением здесь водоносных систем (гидрогеологических структур) ограниченного взаимодействия подземных и поверхностных вод. В пределах Восточно-Сибирской артезианской области к ним относятся артезианские бассейны: Тунгусский, расположенный в верхней и средней части бассейна р. Вилюя, и Лено-Вилюйский, охватывающий часть бассейна р. Лены с нижним течением ее притоков Алдана и Вилюя. Основные водоносные комплексы в этих структурах связаны с четвертичными, мезозойскими и верхнепалеозойскими отложениями. Резкое усиление суровости мерзлотных условий в северном направлении приводит к уменьшению количества и размеров таликов и соответственно к сокращению разгрузки подземных вод. В частности, водоносный комплекс четвертичных отложений на большей части площади своего распространения глубоко проморожен и содержит воду только в пределах подрусловых и подозерных несквозных таликовых зон. Особенность этих вод – их разнообразный состав и минерализация, меняющиеся по площади и разрезу талика, что определяется, прежде всего, проницаемостью водосодержащих пород и активностью водообмена. При этом надмерзлотные талики в долинах рек и озерных котловинах, как правило, ограничены чашей озера или руслом реки и очень редко выходят на пойменные террасы. Дебиты скважин и родников редко превышают 1 л/с, но в долине Лены иногда превышают 200 л/с,

и в зимнее время с ними связаны устойчивые наледи [10–12].

В нижнем течении Лены (створ Кюсюр) наблюдается некоторое сокращение общего речного стока (до 10%) и практически неизменное состояние ресурсов подземных вод (изменение меженного стока в пределах 0%), что требует своего дальнейшего уточнения (таблица, рис. 6, 7). Уменьшение среднегодового стока Лены связано в основном с отсутствием крупных притоков на этом меридиональном участке реки, естественными потерями ее стока и слабым подпитыванием подземными водами из-за широкого развития ММП. При этом следует отметить, что, в отличие от среднегодового стока, меженный сток практически не меняется, что свидетельствует о его стабильности за счет вклада стока малых рек и неполного промерзания болотных отложений при современном климате. Иными словами, можно полагать, что меженный сток на этом меридиональном отрезке русла Лены не претерпевает существенных изменений и находится в пределах точности измерения расходов рек. Это может быть связано с современными условиями формирования зимнего стока малых рек на участке Табага–Кюсюр, которые полностью не промерзают при суммарном повышении отрицательных зимних температур и вносят свой вклад в изменение зимнего стока (рис. 7). В связи с потеплением климата болота становятся более теплыми, мерзлый торф и заторфованные породы оттаивают на большую глубину, и болотные воды в большей мере участвуют в формировании стока и ресурсов подземных вод.

Развитые в этой зоне Хатангский, Нижнеленский, Оленёкский, Котуйский, Колымский и Кондаковский артезианские бассейны, а также северное крыло Якутского артезианского бассейна, Анабарский и Оленёкский гидрогеологические массивы относятся к структурам ограниченного взаимодействия подземных вод с поверхностными. В пределах этих структур распространены разнообразные по составу и возрасту водоносные комплексы от четвертичных отложений до кристаллических пород архея включительно. Их объединяет глубокое промерзание верхних горизонтов гидрогеологического разреза (500 м и более), что затрудняет взаимодействие подземных вод с поверхностными и их участие в формировании речного стока. В этом отношении только воды подрусловых и подозерных таликов могут иметь определенное значение. Однако подмерзлотные воды нередко обладают определенным напором и участвуют в постоянном подпитывании крупных и средних рек.

Оценка современных водных ресурсов бассейна Лены свидетельствует об их изменении в различной степени по всем рассмотренным створам р. Лены и ее притоков за последние десятилетия

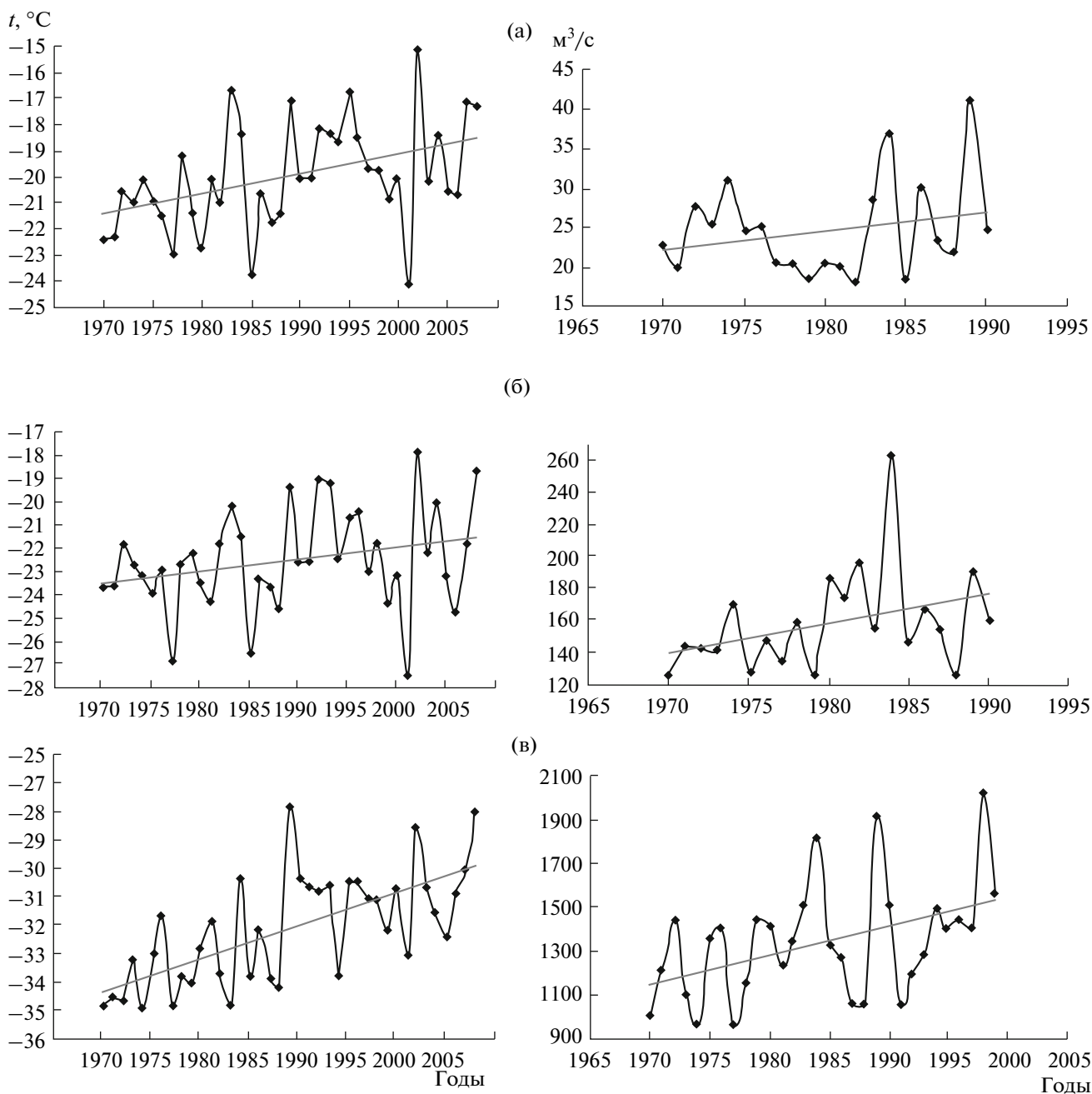


Рис. 7. Изменение зимних температур (слева) и меженного стока (справа) за ноябрь–март (а – м/ст Жигалово, 1970–2008 гг.; р. Лена, г/п Качуг 1970–1990 гг., б – м/ст Мамакан, 1970–2008 гг., р. Витим, г/п Бодайбо, 1970–1990 гг., в – м/ст Якутск, 1970–2008 гг., р. Лена, г/п Табага, 1970–1999 гг.).

(рис. 6а, 6б). Но вместе с тем следует подчеркнуть, что практически по всем замыкающим створам наблюдается рост как годового, так и, особенно, меженного и минимального стока (таблица). В частности, годовой сток всего бассейна Лены в замыкающем створе Кюсюр по сравнению с 30-летним периодом до 1970 г. растет примерно на 5%, меженный – на 30, а минимальный – на 80%. Установленная динамика изменения различных

характеристик стока Лены прослеживается и для других ее притоков, что, на взгляд авторов, выявляет особенности формирования стока многих рек на территории России. При этом следует отметить, что малые речные водосборы более динамично реагируют на вариации климатических параметров (температура, осадки), и именно благодаря их вкладу прослеживаются изменения в водных ресурсах ряда речных систем [3, 4].

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЗИМНЕГО МЕЖЕННОГО (ПОДЗЕМНОГО) СТОКА РЕК ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Среди факторов формирования и изменения стока рек Восточной Сибири ведущая роль принадлежит климатическим характеристикам, особенности вариаций которых приведены выше. Вместе с тем, особого внимания заслуживают особенности формирования стока в зимний период, который в этих климатических условиях составляет 5–6 месяцев. Формирование зимнего стока – многофакторный процесс, в котором ведущую роль играют оттепели, степень промерзания малых притоков и зоны аэрации, рост заозерности и заболоченности водосборов. Повышение годовой и особенно зимней температуры приводит к уменьшению не только глубины промерзания ММП, но и объемов аккумуляции влаги в мерзлой зоне за счет ее миграции к фронту промерзания. В связи с этим наблюдается рост расходов зимнего подземного стока, дренируемого реками, особенно в прирусловой зоне при высоком залегании грунтовых вод. Во время оттепелей происходит снеготаяние и водоотдача из снежного покрова, формируется поверхностный сток и пополнение запасов грунтовых вод. Уменьшение мощности снежного покрова и запасов влаги в нем приводит к уменьшению талого стока весной.

Вклад оттепелей в увеличение зимнего стока малых и средних рек России за 1980–2007 гг. достигает 40%, в то время как влияние на сток уменьшения глубины промерзания и сокращения объемов аккумуляции влаги у фронта промерзания может составлять 60% [11]. Это еще раз подтверждает то, что при уменьшении глубины промерзания растет доля зимнего подземного стока. По данным непосредственных наблюдений глубина сезонного промерзания зоны аэрации постоянно сокращается, и в 2003–2009 гг. она составляла всего 15–20 см в центральной части России, т.е. снизилась примерно в 2–3 раза. Снижение глубины промерзания пород в последние годы может наблюдаться на 50% площади водосбора малых и средних рек в зоне распространения островной мерзлоты, что приводит к увеличению потерь талых вод на инфильтрацию и к сокращению расходов весеннего половодья. Современный режим речного стока характеризуется увеличением зимней или подземной составляющей и уменьшением весеннего половодья с распластыванием максимальной волны.

Малые реки и ледовый покров

Выше отмечалось, что сток рек крупных бассейнов в основном формируется сравнительно малыми притоками длиной до 15 км. Для бассейна Лены они составляют 70–80% протяженности

гидрографической сети. Однако в условиях суровой зимы Сибири эти реки могут перемерзнуть или же существенно сокращать свое живое сечение. Именно от соотношения между сокращением пропускной способности участка реки и притоком зимнего меженного стока зависят формирование наледей или же снижение притока подземных вод в реку [11].

Установлено, что при современном росте зимних температур происходит уменьшение толщины речного льда, сохранение стока в малых реках и повышение расходов меженного (подземного) стока к концу зимы по ряду створов на р. Лене и ее притоках (рис. 7). Из приведенных графиков следует, что при повышении зимних температур на 2–4°C меженный сток Лены и ее основных притоков (рек Витим, Алдан, Вилюй и др.) возрастает на 30% и более.

В нижней части бассейна Лены, на отрезке между постами Табага и Кюсюр, на современное изменение зимнего стока, помимо Алдана и Вилюя, некоторое влияние могут оказывать небольшие реки, стекающие с Верхоянского хребта. В связи с увеличением зимних температур воздуха (метеостанция Якутск) (рис. 7) толщина льда на этих реках сокращается и зимний сток возрастает. Об этом свидетельствуют и коэффициенты вариации зимнего минимального 30-сут стока, которые для малых рек превышают 0.5. Следовательно, ледяной покров малых и средних рек служит регулятором водообмена гидрографической сети с водонесными горизонтами, что особенно важно в последние десятилетия в связи с повышением годовых и сезонных температур воздуха [11].

Изменение параметров речного стока зависит от числа и площади озер и болот в зоне распространения ММП Восточной Сибири. Повышение среднегодовой температуры приводит в основном к изменению площади существующих и образованию новых термокарстовых озер. Увеличение их площади наиболее отчетливо проявляется в Центральной Якутии, где произошло практически двукратное увеличение их числа и площади с образованием многочисленных малых озер. Однако в зоне сплошного распространения ММП наблюдается уменьшение количества и площади термокарстовых озер в результате их дренирования водотоками с образованием безводных котловин (хасыреев). На отдельных участках равнинных территорий (Яно-Индибирская низменность) происходит заполнение водой ранее осушенных котловин. Разнонаправленные процессы образования и осушения термокарстовых озер наблюдаются в Забайкалье. Это связано как с сокращением площади средних по размерам озер (осушение их центральной части), так и с расширением площадей и образованием малых озер [8, 9].

Талые озера Восточной Сибири выделяют метан в виде пузырьков при разложении подводной органики. Однако эта пузырьковая эмиссия происходит крайне неравномерно в пространстве и во времени, что затрудняет и снижает точность ее суммарной оценки. По существующим оценкам талые озера ежегодно выбрасывают в атмосферу ~4 млн т метана. Этому процессу способствует разложение так называемой погребенной едомы — мерзлого субстрата плейстоценового возраста, насыщенного органикой (2%) и содержащего 50–90% древнего льда.

Заболоченность водосборов

Исследуемая территория сильно заболочена, особенно долина нижнего течения Лены, Центрально-Якутская, Северо-Сибирская и Яно-Индигирская низменности. Болотные массивы проникают даже в горы Сибири. Скованная мерзлотой верхняя зона земной коры и продолжительные холода способствуют накоплению влаги. Однако глубина болот в Восточной Сибири, как правило, небольшая, так как в таких климатических условиях торф образуется медленно. Так, в Центральной Якутии мощность торфа составляет на водоразделах рек 0.4 м, а на речных террасах — до 1 м. Однако болота на осушенных и зарастающих термокарстовых озерах отличаются значительной глубиной, до 5 м в Верхоянском районе и по берегам Лены и Алдана [8].

В связи с потеплением климата болота становятся более теплыми, мерзлый торф и заторфованные породы оттаивают на большую глубину, особенно в речных долинах южной тайги. Поэтому болотные комплексы могут служить дополнительным источником питания малых и средних притоков Лены, Вилюя, Алдана и других рек в зоне островной и прерывистой мерзлоты. На более глубокое протаивание болотных массивов указывает существенное увеличение эмиссии парниковых газов в последние десятилетия. Это свидетельствует как о повышении годовой и сезонных температур верхней зоны болот (особенно за холодный период года), так и об активизации деятельности различных бактерий.

Большинство болот России находится в криолитозоне. Общая площадь многолетнемерзлых болот в этой зоне составляет ~0.7 млн км², и они содержат ~50 Гт углерода. Заторфованные почвы этой территории выделяют больше метана, чем почвы за пределами ММП. По оценкам эмиссия метана с поверхности болот криолитозоны составляет 20 млн т/год, в то время как с поверхности немерзлых почв — ~4 млн т/год.

За счет более высоких годовых и сезонных температур последних лет и соответственно активного разложения болотной органики наблюдается уси-

ление потока метана и диоксида углерода. В результате суммарное увеличение поступления метана из заболоченных массивов мерзлой зоны на территории России возрастает на 6–10 млн т/год. Таким образом, таяние болот в Сибири может привести к существенному увеличению содержания метана в атмосфере и способствовать росту глобальной температуры воздуха. Однако с учетом эффективного времени жизни молекулы метана в атмосфере ~12 лет ежегодное увеличение эмиссии метана на 6–10 млн т вызовет рост его равновесной атмосферной концентрации к середине XXI в. на несколько десятков млн. т. Радиационное воздействие такого количества метана увеличит среднегодовую температура всего на 0.012°C [1].

Концентрация CH₄ в мерзлых заторфованных грунтах достигает 33 мл/кг. Изотопный состав углерода метана указывает на его биогенное происхождение. Современное выделение метана происходит в основном при положительных температурах, но по некоторым данным образование и эманация части CH₄ возможны и при отрицательных температурах. В связи с этим повышение температуры грунта способствует увеличению доступного разложению органического субстрата и усилению эмиссии парниковых газов. При выделении углерода в виде метана происходит многократное усиление парникового эффекта, так как метан по своим радиационным свойствам в 21 раз активнее CO₂ [5]. При этом из всех углеводородов метанового ряда этот газ — самый устойчивый. Поэтому в осадочных породах, где метан образует глубокие залежи и обычно преобладает восстановительная геохимическая обстановка, он может сохраняться десятки и сотни миллионов лет. Кроме того, большое количество метана находится в связанном гидратном состоянии под слоем многолетней мерзлоты и в субаквальных отложениях при низких температурах и высоких давлениях. При современном таянии ММП Сибири в атмосферу поступает “законсервированный” в грунте в эпоху плейстоцена (35260–42900 лет) и голоцена (1400–12000 лет) метан. Доля плейстоценового метана в выбросах сибирских озер в целом достигает 40–80% [5, 15].

Исследования содержания и распределения CH₄ в ММП активно проводятся с конца 1980-х гг. По современным оценкам величина потока CH₄ с заболоченных и переувлажненных земель может достигать 188 мг С(CH₄)/м² в сутки. Эти потоки CH₄ отличаются высокой пространственной и временной изменчивостью в зависимости от температуры, влажности, глубины оттаивания, типа растительности. Наиболее активно процесс образования CH₄ развивается в породах сезонноталого слоя и таликах в результате деятельности метаногенных микроорганизмов. Установлено, что

постепенное эпигенетическое промерзание горных пород ведет к повышению концентрации CH_4 в сокращающихся по мощности талых породах и его консервации в литологических и криогенных ловушках. Эти процессы проявляют себя активно при неравномерном промерзании отложений различного состава. Можно полагать, что дальнейшая деградация ММП приведет к активации метаногенеза в оттаявших отложениях. По существующим оценкам повышение влажности метаносодержащих осадков (до 70%) приводит к увеличению эмиссии метана примерно на порядок. Однако, как отмечено выше, это не приведет к катастрофическому выбросу CH_4 в атмосферу на северо-востоке России.

Прямые измерения содержания CH_4 в ММП дают основания полагать, что на северо-востоке России на площади ~ 180 тыс. км², в верхних 25 м мерзлых пород содержится ~ 10.0 млрд м³ CH_4 [9]. В связи с этим ММП можно рассматривать как один из важнейших резервуаров метана. Прогнозируемое оттаивание мерзлых пород на 2–3 м приведет к эмиссии из ММП до 1.7 млрд м³ CH_4 , что соответствует поступлению в экосистемы порядка 2–15 г $\text{C}(\text{CH}_4)/\text{м}^2$. Прогнозируемая эмиссия CH_4 при современном оттаивании ММП будет меньше расчетной голоценовой эмиссии, так как в динамике площадей и количества термокарстовых озер на северо-востоке России в течение последних десятилетий наблюдается их сокращение. Это свидетельствует о том, что современная толща ММП не может служить потенциально значимым источником метана в атмосфере в связи с эпигенетическим промерзанием подозерных таликов, что, в свою очередь, существенно сокращает и даже предотвращает эмиссию CH_4 из осушенных озерных котловин (хасыреев). Следовательно, прогрессирующая деградация мерзлоты на северо-востоке России не приведет к существенным изменениям в обмене CH_4 между экосистемами и атмосферой. С другой стороны, оттаивание ММП и сокращение площади озер приводит к увеличению речного стока и береговой эрозии [9, 13].

Результаты многолетних исследований на северо-востоке Азии показали, что содержание растворенного метана в озерах и болотах уменьшается на 1–2 порядка по направлению к арктическим морям. Это свидетельствует о том, что роли водных объектов суши недостаточно для объяснения механизма формирования наблюдающегося максимума метана в атмосфере Арктики. Поэтому существует другой мощный региональный источник, который активно себя проявляет в теплые эпохи. Таким крупнейшим источником метана в Восточной Сибири служит арктический шельф морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. В ре-

зультате выполненных натуральных исследований и непосредственных количественных определений установлено, что по объемам выбросов метана арктический шельф сравним со всем Мировым океаном и потенциально может оказать влияние на климат при прогрессирующем развитии эмиссии парникового газа. Виной всему – освобождение законсервированных газогидратов метана при таянии подводных ММП шельфа.

Под ММП шельфа объемы захороненного метана настолько велики, что в случае его резкого выброса содержание CH_4 в атмосфере может вырасти на порядок. Последнее зависит от температуры подводного слоя ММП, которая в настоящее время близка к среднегодовой температуре придонной воды и изменяется от -0.5 до -1.8°C , т.е. близка к температуре таяния. В то же время температура ММП на суше арктического побережья близка к -11°C . Таким образом, подводная толща ММП утрачивает в последние десятилетия свою роль непроницаемой покрывки для газов, что способствует утечке метана из донных отложений в водную толщу и в атмосферу. Следует оценить, с какой скоростью будет деградировать ММП суши и шельфа Сибири в XXI в., так как от этого зависят масштабы постепенной эмиссии метана и вероятность его быстрого выброса в атмосферу.

Многоступенчатые гидрогеохимические реакции – основной механизм вывода метана из атмосферы [2]. Из других возможных путей удаления или снижения повышенных концентраций метана определенное значение имеют его поглощение почвенными бактериями и эмиссия в стратосферу. Однако их вклад составляет $\sim 10\%$ общего стока метана из атмосферы. Если концентрация метана в атмосфере над основными очагами его выброса практически не растет, то скорость эмиссии метана сравнительно невелика и равна скорости его вывода. Быстрые или даже катастрофические выбросы метана свидетельствуют о прогрессирующей деградации криолитозоны и активной минерализации древнего и современного органического вещества при повышении температуры. Поэтому непосредственные количественные определения концентрации метана не только в очагах его выброса, но и в атмосфере чрезвычайно важны для оценки состояния и прогноза климатических вариаций и, как следствие – изменения стоковых характеристик.

ВЫВОДЫ

Статистический анализ рядов температуры воздуха и осадков за холодный (XI–III мес) период года показал наличие в большинстве случаев статистически достоверных возрастающих трендов с коэффициентами линейного тренда 0.3 – $0.52^\circ\text{C}/10$ лет и 14 – 16 мм/10 лет. Средние темпера-

туры воздуха и осадков за теплый период (IV–X мес) также имеют тенденцию к увеличению (0.04–0.12°C/10лет и 1–10 мм/10 лет).

Изменение климата Восточной Сибири сопровождается сокращением мощности ледового покрова на малых и средних реках, большей глубиной протаивания ММП и болотных массивов. При этом наблюдается рост эманации парниковых газов, что может сказываться на локальном повышении приповерхностной температуры. Указанные изменения наряду с современным соотношением основных стокообразующих климатических факторов (температура, осадки, испарение) обуславливают увеличение (уменьшение) общих водных и естественных ресурсов подземных вод.

Основная особенность современных изменений речного стока – увеличение в последние десятилетия межлетнего стока. Для ряда створов выявлены статистически значимые возрастающие тренды. Изменения годового стока менее существенны. При этом на меридиональном отрезке русла Лены (между створами Табага и Кюсюр) межлетний сток практически не меняется, а годовой – снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем, СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. Т. XX. С. 124–142.
2. Бажин Н.М. Метан в атмосфере. 2000. <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/958.html>
3. Водные ресурсы России и их использование/ Под ред. Шикломанова И.А. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
4. Георгиади А.Г., Золотокрылин А.Н. Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы. М., Тверь: Триада, 2007. 576 с.
5. Глобальное потепление: Северный Ледовитый океан производит огромное количество метана. 2010. <http://ultimaguardian.livejournal.com/319388.html>
6. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Кричевец Г.Н. и др. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 17–24
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. М.: Росгидромет, 2011. 66 с.
8. Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 2. С. 16–26.
9. Краев Г. Н. Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-востоке России и прогноз его поступления в атмосферу. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук, М.: Институт географии РАН, 2010. 20 с.
10. Куделин Б.И. Подземный сток на территории СССР. М.: Изд-во МГУ, 1966. 302 с.
11. Марков М.Л. Проблемы оценки естественных ресурсов подземных вод по гидрологическим данным в условиях изменения климата // Матер. междунар. науч. конф. “Ресурсы подземных вод”. М.: Макс-Пресс, 2010. С. 94–98.
12. Протасьев М.С. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1972. Т. 17. 407 с.
13. Федоров Ю.А., Гамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2007. 330 с.
14. World water resources at the beginning of the 21st century. Project of IHP UNESCO / Ed. Shiklomanov I.A. St. Petersburg, 1999. 395 p.
15. www.nature.ykt.ru