

## ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА БАССЕЙНА РЕКИ ПЕНЖИНЫ ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВВ.

О.А. Шиловцева, Н.Н. Шабанова, Н.К. Кононова\*

*Зав. лаб., мл. н. с., Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

*119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1*

*Тел.: (495) 939-24-79, 939-25-26*

*E-mail: shil\_o@mail.ru, nat.volobuyeva@gmail.com*

*\*Вед. инж., Институт географии РАН*

*117017 Москва, Вавилова, 37, 33*

*Тел.: (499) 129-04-74*

*E-mail: ninakononova@yandex.ru*

*РЕГИОНАЛЬНЫЙ КЛИМАТ, КАМЧАТКА, РЕКА ПЕНЖИНА, ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА, ОСАДКИ, РЕАНАЛИЗ ERA INTERIM, ТИПИЗАЦИЯ ДЗЕРДЗЕЕВСКОГО, РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС*

Рассмотрен временной ход температуры воздуха и осадков за весь период наземных наблюдений на трех метеорологических станциях Пенжинского района Камчатского края — Каменское, Слаутное и Верхне-Пенжино. Данные наблюдений сопоставлены с материалами реанализа ERA Interim. Проанализирована временная изменчивость радиационных и циркуляционных факторов, формирующих климат, тенденции изменения которых согласуются с трендами метеорологических параметров. За период с 1950 г. по 2013 г. в бассейне Пенжины средняя за год температура воздуха выросла на 1 °С. Рост средней за месяц температуры с уровнем значимости  $P$  менее 0,1 отмечен в девяти месяцах из двенадцати, причем потепление наиболее заметно в мае–августе ( $P < 0,01$ ). Однако в январе заметно холодает (на 6,5 °С за этот же период). Отрицательный тренд годового количества осадков составил 80 мм за период 1966–2013 гг.,  $P = 0,1$ . Наиболее заметно уменьшение осадков зимой ( $P < 0,05$ ), в теплое время года в ряде месяцев количество осадков незначительно возросло. Расчеты по ERA Interim хорошо воспроизводят межгодовые колебания температуры воздуха, удовлетворительно — колебания осадков, несколько завышая абсолютные значения.

## PENZHINA RIVER BASIN CLIMATE CHANGE DURING THE SECOND HALF OF THE XX – THE BEGINNING OF THE XXI CENTURIES

О.А. Shilovtseva, N.N. Shabanova, N.K. Kononova\*

*Head of the lab., researcher, Lomonosov Moscow State University*

*119991 Moscow, GSP-1, Leninskie Gori, 1*

*Tel.: (495) 939-24-79, (495) 939-25-26*

*E-mail: shil\_o@mail.ru, nat.volobuyeva@gmail.com*

*\*Leading engineer, Institute of Geography, RAS*

*117017 Moscow, Vavilova, 37, 33*

*Tel.: (499) 129-04-74*

*E-mail: ninakononova@yandex.ru*

*REGIONAL CLIMATE, KAMCHATKA, PENZHINA RIVER, SURFACE AIR TEMPERATURE, PRECIPITATION, REANALIS ERA INTERIM, TYPISATION OF DZERDZEYEVSKY, NET RADIATION*

The time course of air temperature and precipitation for the whole period of ground-based observations at three meteorological stations of Penzhinsky District of Kamchatsky Krai — Kamensky, Slautnoe and Verkhnyaya Penzhina were examined. These observations were compared with reanalysis ERA Interim data. Temporal variability of radiation and circulating factors forming the climate change were analyzed. Their tendencies agree well with trends of meteorological parameters. During the period 1950–2013 in the basin of Penzhina climate became warmer on the 1 °C. The average monthly temperature increase is marked in the nine months of 12 (significance level  $P$  less than 0.1). During the May–August the warming is most noticeable ( $P < 0.01$ ). However, in January there is significantly colder (on the 6.5 °C over the same period). At the same time, the yearly amount of precipitation decreased by 80 mm (for the period 1966–2013,  $P = 0.1$ ). In winter the decrease of precipitation is the most significant ( $P < 0.05$ ), during the warmer period of the year the increase of precipitation takes place in the some of months. Calculations by ERA Interim well reproduce the interannual air temperature fluctuations, satisfactory — fluctuations in precipitation, somewhat overestimated the absolute values.

Северная часть Дальнего Востока — один из самых сложных географических объектов в России. Обширные пустынные таежные и тундровые пространства, скованные вечной мерзлотой, высокие и протяженные горные системы с ледниками, разделенные глубокими долинами мощных рек, многочисленные озера и болота, беспокойные моря с

быстро меняющимся ледовым покровом и высокими приливами, — все это определяет чрезвычайно многообразную, мозаичную и динамичную природную систему. Климат — важнейший ее элемент, поскольку он, формируясь под воздействием как глобальных закономерностей атмосферной циркуляции, так и локальных орогидро-

графических особенностей, оказывается и одним из основных факторов функционирования экосистем. На фоне современных климатических изменений особое значение приобретает анализ их региональных тенденций, основанный не только на материалах наземных наблюдений, которых в столь сложном районе всегда недостаточно, но и на результатах моделирования. В бассейне Пенжины, где располагается всего три пункта наблюдений, подобные работы приобретают особый интерес. Поэтому в программу комплексной экспедиции 2014 г., организованной ВНИРО, КамчатНИРО и МГУ им. М.В. Ломоносова, были включены климатические исследования. Их главная цель — оценка изменений климата бассейна Пенжины во второй половине XX – начале XXI века.

Работ, посвященных изучению климата Камчатки, очень немного (Кондратюк, 1974, 1983), в последние годы исследования проводятся в Дальневосточном федеральном университете (г. Владивосток) (Шкаберда, Василевская, 2013; Шкаберда и др., 2014а; Шкаберда и др., 2014б; Шкаберда, 2014).

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Основой для анализа послужили результаты многолетних наблюдений на двух метеорологических станциях Пенжинского района, размещенные на сайте ВНИИГМИ–МЦД ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)) (станции Каменское, Верхне-Пенжино), данные о погоде с сайта «Расписание погоды» (<http://tr5.ru>) и справочника (Климат России, 2011). По станции Слаутное данные ежегодных наблюдений отсутствуют, опубликованы лишь многолетние средние. Каменское, Слаутное и Верхне-Пенжино находятся в нижнем, среднем и верхнем течении Пенжины соответственно. Все они труднодоступны, в рядах

наблюдений имеют место значительные пропуски, особенно после 2000 г. (табл. 1). В первую очередь это касается далекой станции Верхне-Пенжино, что затрудняет анализ современных изменений климата для огромной слабо освещенной метеорологическими данными территории.

### Сопоставление данных наблюдений с данными реанализа

Поскольку в XXI в. в материалах наблюдений было много пропусков, то встал вопрос о возможности как-то их заполнить. Интерполяция между наблюдениями Каменского и Верхне-Пенжино не решало проблемы, т. к. часто наблюдения отсутствовали одновременно. Кроме того, расстояние между станциями велико, и их разделяет Ичигемский хребет высотой до 1450 м. Поэтому пропуски в рядах среднемесячной температуры воздуха и осадков для Каменского восстановлены с применением реанализа ERA Interim (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>) (Dee et al., 2011). Данные реанализа сравнивались с данными наблюдений для оценки их качества, поскольку при отсутствии реальных наблюдений реанализ остается единственным источником информации о климате.

Сопоставление результатов наблюдений с расчетной средней за месяц температурой воздуха или месячной суммой осадков на основе реанализа в точке сетки, наиболее близко располагающейся к метеостанции Каменское за период 1979–2013 гг., позволило получить эмпирические зависимости между ними. Коэффициенты корреляции для температуры воздуха не опускались ниже 0,92, тогда как для осадков они были значительно ниже и, наоборот, не превысили 0,9 (рис. 1). Уменьшение точности восстановления температуры воздуха в летнее время связано с неоднородностью подсти-

Таблица 1. Периоды наблюдений метеорологических параметров в Пенжинском районе Камчатского края

Метеорологический параметр	Каменское, 10 м над у. м.	Слаутное, 44 м над у. м.	Верхне-Пенжино, 324 м. над у. м.
Температура воздуха, °С	1949–2000, 2000...2007, 2008–2013	1961–2006	1944–2000, 2001...2012
Осадки, мм	1966–2000, 2001...2007, 2008–2013	1966–2000	1966–2000, 2001...2012
Давление воздуха на уровне станции, ГПа	1966–2000, 2001...2007, 2008–2013	1961–2005	1961–2005
Продолжительность солнечного сияния, час	1963...2012	1971–2000	1961–2000
Упругость водяного пара, ГПа	1953–2000, 2000...2007, 2008–2013	1966–2005	1966–2005
Снежный покров, см	1966–2008	1966–2009	1966–2005
Облачность, балл	1977–2003	1977–2004	1977–2000
Ветер, румбы, м/с	1966–2005	1966–2005	1966–2005

Примечание. Цветом выделены данные справочника (Климат России, 2011). Годы, разделенные точками, а не тире, обозначают периоды, в которых имели место значительные пропуски в данных

лающей поверхности, тогда как в холодное время года благодаря снежному покрову она более однородна.

Связь между месячными суммами рассчитанных осадков по модели и наблюдениям значительно хуже, чем для средних за месяц температур воздуха (рис. 1). Так как осадки — один из самых сложно воспроизводимых метеорологических параметров, восстановление их рядов затруднено.

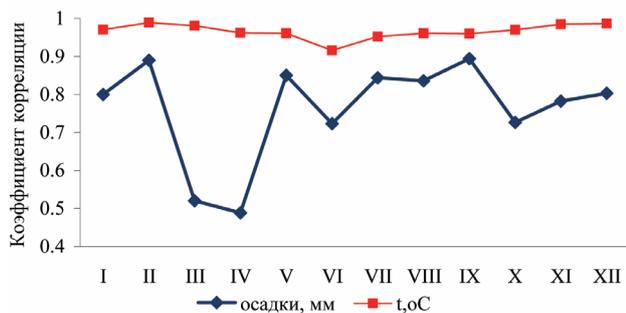


Рис. 1. Годовой ход коэффициентов корреляции между расчетными и наблюдаемыми величинами средней за месяц температуры воздуха (t, °C) и суммы осадков за месяц (мм), Каменское

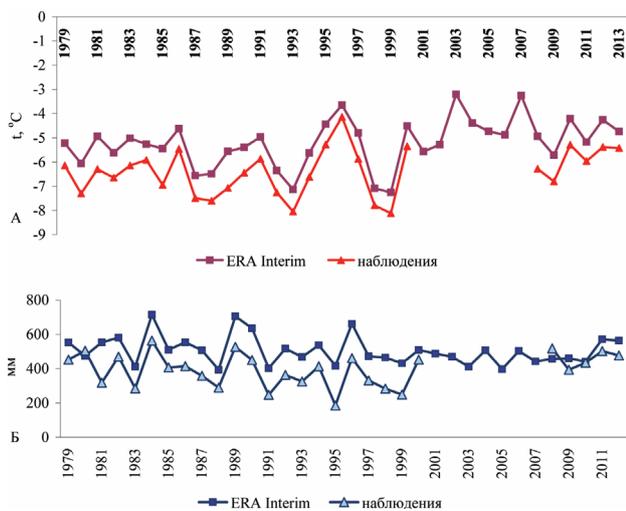


Рис. 2. Сопоставление многолетнего хода средней годовой температуры воздуха (А) и годовой суммы осадков (Б) по наблюдениям и данным реанализа

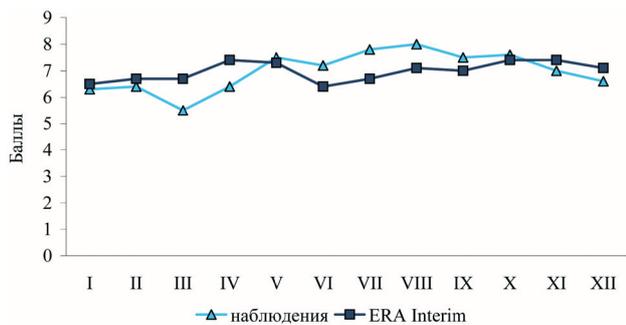


Рис. 3. Годовой ход среднего за месяц балла общей облачности по данным наблюдений на ст. Каменское (1977–2003) и реанализу (1979–2003)

Поэтому там, где пропуски в наблюдениях многочисленны (Верхне-Пенжино), они не заполнялись.

Коэффициент корреляции между наблюдениями и расчетом для средних за год температур воздуха высок (0,97), и их изменения от года к году за 1979–2013 гг. практически совпадают (рис. 2А). Расчетные величины температуры выше данных наблюдений в среднем на 1 °С, разница между ними колебалась от 0,5 °С (1996) до 1,5 °С (1989).

Годовые суммы осадков по модели и непосредственным наблюдениям согласуются в меньшей степени: коэффициент корреляции между ними 0,71. Их межгодовые изменения совпали в 85% случаев, и только в 15% прослеживается несовпадение тенденций изменения от года к году осадков по наблюдениям и реанализу. Данные расчета превышают наблюдения в среднем на 122 мм, изменяясь от 235 мм в 1981 г. до 6 мм в 2010 г. Только в двух случаях измеренные осадки оказались меньше расчетных: в 1980 г. — на 30 мм, и в 2008 г. — на 61 мм (рис. 2Б).

Также сопоставлены расчетные и фактические данные по общей облачности (рис. 3). Среднее годовое количество облачности совпало очень хорошо: и по данным реанализа, и по данным наблюдений оно равно 7 баллам. В годовом ходе наибольшие превышения модельных данных над фактическими составили 1,2–1,1 балла в марте и апреле. В июне–августе, наоборот, наблюдения превысили расчет на 1 балл. Наилучшее совпадение между этими параметрами наблюдается в зимнее время.

Таким образом, моделирование хорошо воспроизводит межгодовую динамику температуры воздуха и удовлетворительно — годовой суммы осадков. Но расхождения между реальными и расчетными абсолютными значениями параметров могут быть довольно существенными.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Особенности радиационного режима

Поскольку климат местности формируется, главным образом, радиационным режимом и региональными особенностями циркуляции атмосферы, рассмотрим вначале, как меняются эти два основных фактора во времени.

Бассейн р. Пенжины расположен в северной климатической подобласти полуострова Камчатка и характеризуется резко континентальным климатом, ведущую роль в формировании которого

играют процессы сезонного радиационного нагрева и выхолаживания, а роль циркуляционных условий значительно меньше (Кондратюк, 1974). К сожалению, в Пенжинском районе никогда не проводились актинометрические исследования. В 1970-е гг. появились оценки средних величин составляющих радиационного баланса косвенными методами (Кондратюк, 1974).

Нами на основе реанализа ERA Interim получены оценки составляющих радиационного баланса и их трендов за период 1979–2013 гг. для точки сетки, ближайшей к станции Каменское (рис. 4).

Суммарная радиация за год ( $Q$ ) — основная приходная часть баланса коротковолновой радиации — по данным расчетов составила около  $3300 \text{ МДж/м}^2$ . В годовом ходе она изменяется от  $8\text{--}15 \text{ МДж/м}^2$  в декабре до  $470\text{--}705 \text{ МДж/м}^2$  в мае. Подобный сдвиг максимума в годовом ходе суммарной радиации объясняется наличием снежного покрова в мае, что значительно увеличивает отраженную радиацию. Ее линейный тренд за последние 35 лет практически не выражен, хотя и имеет положительную тенденцию (рис. 5А).

Коротковолновый радиационный баланс (RB) на данной территории (разность между приходящей суммарной и отраженной от земной поверхности радиацией, или поглощенная радиация) со-

ставляет  $2300\text{--}2500 \text{ МДж/м}^2$ , возрастая в годовом ходе от  $3\text{--}8 \text{ МДж/м}^2$  в декабре до  $340\text{--}590 \text{ МДж/м}^2$  в июне. Линейный тренд этой величины в бассейне Пенжины практически отсутствует, хотя и имеет слабую тенденцию к уменьшению в силу того, что отраженная радиация за этот период увеличилась (рис. 5Б).

Длинноволновый баланс (BI) (разность между тепловыми потоками от земной поверхности и противоизлучением атмосферы, или эффективное излучение, характеризующее потерю тепла земной поверхностью) составил около  $-1200 \div -1300 \text{ МДж/м}^2$ . Для этого параметра прослеживается отрицательная тенденция, причем уровень значимости линейного тренда довольно высок ( $0,07$ ) (рис. 5В). Это происходит за счет того, что растет по модулю собственное излучение земной поверхности, т. к. тренд в многолетнем ходе противоизлучения атмосферы отсутствует.

Общий радиационный баланс (B) (т. е. соотношение между коротковолновым и длинноволновым балансом) за год положителен (т. е. приход энергии больше, чем ее расход) и составляет  $950\text{--}1000 \text{ МДж/м}^2$ , изменяясь от  $-147 \div -43 \text{ МДж/м}^2$  в декабре до  $+235 \div +400 \text{ МДж/м}^2$  в июне. В то же время отмечен статистически значимый тренд к уменьшению годовой суммы радиационного баланса с высокой степенью вероятности —  $0,02$ .

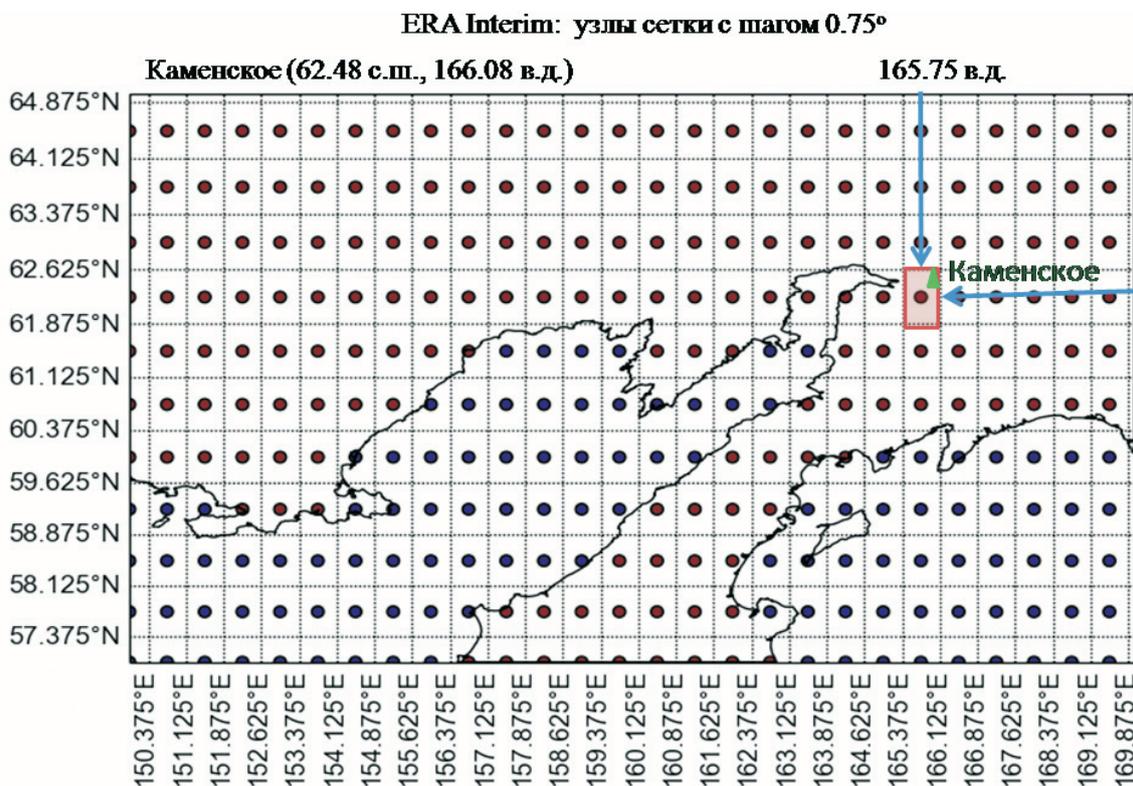


Рис. 4. Расположение точки расчета по модели ERA Interim и метеорологической станции Каменское

Это позволяет сделать вывод, что в бассейне Пенжины наблюдается тенденция к уменьшению количества энергии, которая впоследствии расходуется на разные природные процессы: испарение, турбулентность, нагрев почвы, воды и т. д. Данное заключение достаточно неожиданно, т. к., по общим соображениям, потепление климата должно сопровождаться ростом радиационного баланса. Для прояснения этого противоречия необходимы дальнейшие исследования.

### Особенности циркуляции атмосферы

Динамика циркуляционных процессов — второй важный фактор формирования климатического режима территории.

Зимой основное влияние на погоду в Пенжинском районе оказывает Колымский отрог Сибирского антициклона, что приводит к преобладанию морозной и ясной погоды (Кондратюк, 1974).

Весной сезонный максимум начинает разрушаться и к маю исчезает совсем, области антициклогенеза формируются над Охотским и Беринговыми морями. В целом циркуляция весной характеризуется большой изменчивостью и сочетанием как зимних, так и летних типов. Перестройка термобарического поля на летние условия заканчивается в среднем к июню. Сибирский максимум сменяется Азиатской термической депрессией, а над океаном основным центром действия становится усилившийся и сместившийся к северу Северотихоокеанский максимум. Неглубокие терми-

ческие депрессии могут образовываться и над северной частью полуострова. Значительную роль в формировании погоды играет антициклон, который формируется над Охотским морем и перемещается, как правило, с севера на юг.

Осенью циклоническая деятельность, весьма интенсивная летом, ослабевает, сменяясь к октябрю областью повышенного давления. Начинается разрушение и заполнение Азиатской депрессии, которая к октябрю исчезает совсем, но углубляется Алеутская депрессия, т. к. Северотихоокеанский максимум ослабевает и смещается к югу. В сентябре растет циклогенез в районе Охотского моря, максимум которого к октябрю смещается в его северо-восточную часть (Кондратюк, 1974).

Понятно, что год от года закономерности циркуляционных процессов несколько меняются, поэтому для понимания причин и особенностей изменений метеорологических параметров мы проанализировали динамику циркуляционных процессов во времени. Для этого использована типизация циркуляции атмосферы, разработанная для Северного полушария под руководством Б.Л. Дзердзеевского (Дзердзеевский и др., 1946; Дзердзеевский, 1970). Она позволяет проследить динамику элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) за период с 1899 г. по настоящее время (Кононова, 2009).

В этой типизации ЭЦМ объединены в четыре группы циркуляции для Северного полушария в целом: зональную (с антициклоном на полюсе, без

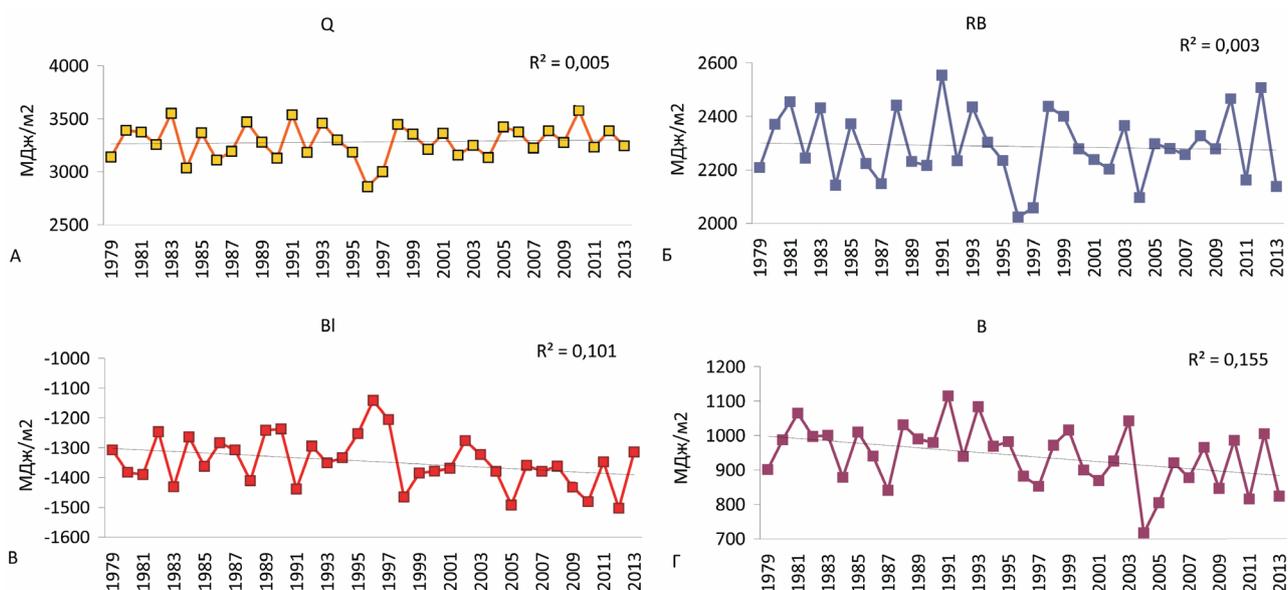


Рис. 5. Многолетние изменения годовых сумм суммарной солнечной радиации (А), коротковолнового радиационного баланса (Б), длинноволнового баланса (В) и общего радиационного баланса (Г) по данным реанализа ERA Interim в точке, ближайшей к метеорологической станции Каменское

блокирующих процессов), нарушения зональности (один блокирующий процесс в каком-либо секторе), меридиональную северную (2–4 блокирующих процесса) и меридиональную южную (циклон на полюсе, без блокирующих процессов, 3–4 одно-временных выхода южных циклонов) (Дзержевский, 1968).

Выделено три циркуляционные эпохи: меридиональная северная (1899–1915), отличающаяся отрицательными отклонениями среднегодовой температуры воздуха на всей Земле, зональная (1916–1956), когда произошло потепление Арктики, и меридиональная южная (1957 — по настоящее время), на которую приходится последнее потепление (Кононова, 2015).

Аналогичные группы циркуляции определены для шести секторов Северного полушария (Дзержевский, 1970; Кононова, 2009). Бассейн Пенжины расположен в северной части Дальневосточного сектора ( $120^{\circ}$ – $170^{\circ}$  в. д.). В нем выделяются только две циркуляционные эпохи. Первая — зональная с преобладанием широтных процессов, которая длилась с начала XX века до конца 1950-х годов, а затем наступила меридиональная эпоха, в течение которой долготная циркуляция проявлялась в значительной степени выходом южных циклонов. Она продолжается по настоящее время.

В Дальневосточном секторе выделено три обобщенных типа циркуляции: широтная, включающая широтную западную в сочетании с долготной южной, и широтную западную в сочетании со стационарным положением (ШЗ) со средней продолжительностью 192 дня в году; долготная северная в сочетании с долготной южной (ДСДЮ) со средней продолжительностью 113 дней

в году; долготная южная (ДЮ) с преобладанием южных циклонов и со средней продолжительностью 55 дней в году за период 1899–2012 гг.

В первой половине XX века, как и на всем Северном полушарии, в северных широтах преобладало перемещение западных циклонов, т. е. преобладал широтный тип циркуляции. Суммарная годовая продолжительность этой группы циркуляции составляла 200–250 дней (рис. 6). Во второй половине XX века и в первое десятилетие XXI века ее продолжительность сократилась до 100–170 дней в году. Зато практически до такого же уровня выросла продолжительность долготной южной циркуляции. Максимальной повторяемости этот процесс достиг в самом конце прошлого – начале настоящего столетия, но примерно с середины

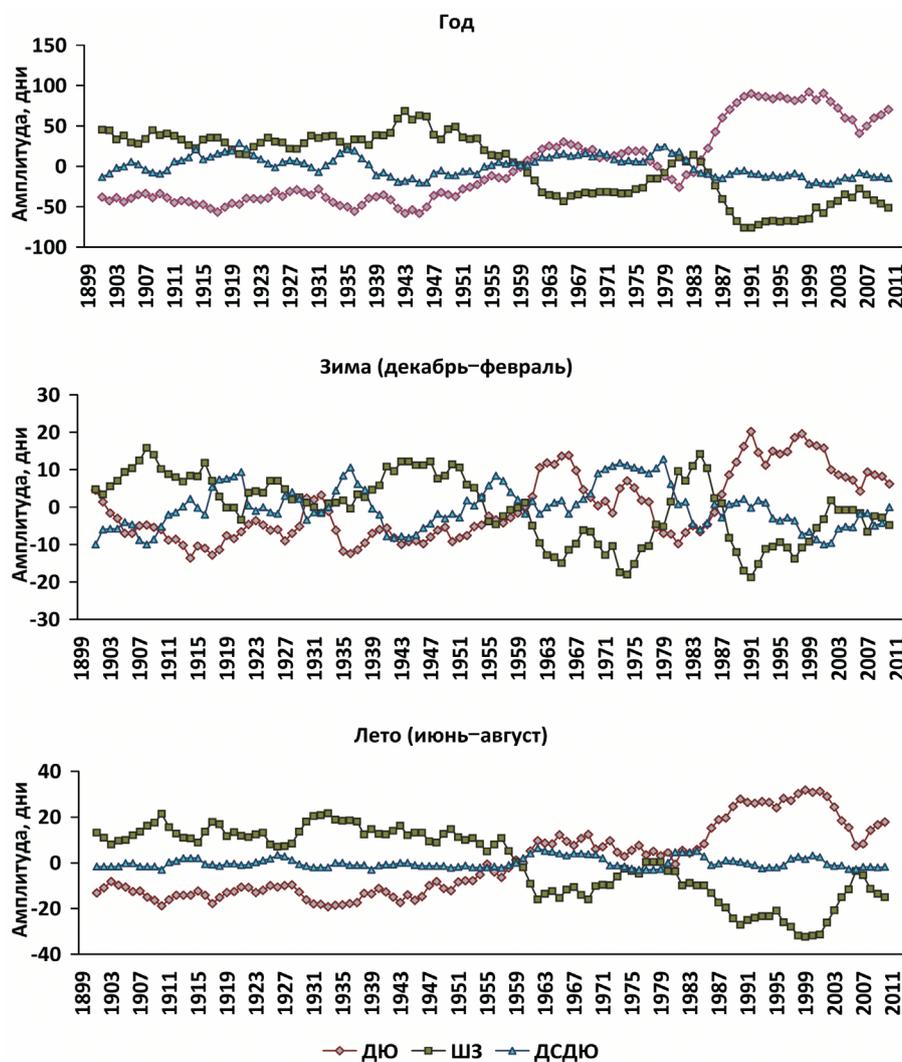


Рис. 6. Отклонения суммарной продолжительности групп циркуляции в Дальневосточном секторе от средней за 1899–2012 гг.: ДЮ — долготная южная; ШЗ — широтная западная, ДСДЮ — долготная северная в сочетании с долготной южной. Пятилетние скользящие средние. По оси ординат отложена амплитуда, равная разности между повторяемостью типа циркуляции в конкретный год и средней повторяемостью за период 1899–2012 гг.

первого десятилетия нынешнего века его повторяемость снова несколько уменьшилась, уступая место широтным формам циркуляции. В настоящее время южные меридиональные потоки опять активизировались (рис. 6).

Если анализировать многолетнюю динамику циркуляционных процессов по сезонам года, то хорошо видно, что в теплое время года вышеописанные закономерности сохраняются, а в холодное — несколько изменились. Так, совершенно очевидна тенденция к уменьшению южной меридиональной составляющей, начиная с 2000-х гг., и увеличение повторяемости как широтной, так и долготных северных типов циркуляции (рис. 6).

**Общая характеристика бассейна р. Пенжины**

Краткая климатическая характеристика бассейна р. Пенжины составлена на основе данных наблюдений трех вышеупомянутых станций (табл. 2).

Верхне-Пенжино располагается в верховьях реки, где климат наиболее континентальный и самый холодный. Зимой температурный фон на 3–5 °С ниже, чем в Слаутном, и на 5–6 °С ниже, чем в Каменском. Летом различия гораздо меньше и не превышают 1 °С, причем в Каменском и Верхне-Пенжино температуры близки, а в Слаутном — самая высокая (14 °С в июле). Кроме того, именно в Сла-

утном самый продолжительный период с положительными температурами (табл. 2).

Наибольшее количество осадков выпадает в Каменском, ближе расположенном к устью реки. Сравнение двух периодов осреднения наглядно демонстрирует повсеместное уменьшение количества осадков. В годовом ходе наименьшее их количество зимой выпадает в Слаутном, летом — в Верхне-Пенжино (самая удаленная от моря станция).

Это хорошо объясняет и особенности залегания снежного покрова по территории. В районе Слаутного в течение зимы снега оказывается почти в два раза меньше, чем на двух других станциях (рис. 7, табл. 2).

Более сильные ветры также дуют в самом близком к устью реки районе: в Каменском средняя за год скорость ветра в 2,5 раза больше, чем в Верхне-Пенжино, причем эти различия сохраняются в течение всего года. В устьевой области Пенжины

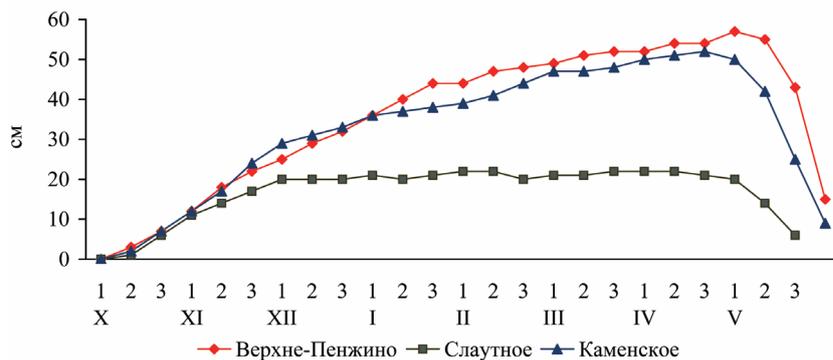


Рис. 7. Изменение по декадам средней высоты снежного покрова

Таблица 2. Климатические характеристики бассейна р. Пенжины (Климат России, 2011) — годовые выводы

	Период наблюдений	Верхне-Пенжино	Слаутное	Каменское
Температура воздуха, °С	1961–1990	-10,1	-7,4	-6,9
	1971–2000	-9,8	-7,3	-6,7
Средняя продолжительность периода с температурой воздуха >0 °С / >5 °С		146/107	161/124	148/118
Осадки, мм	1961–1990	333	297	436
	1971–2000	281	290	388
Число дней с осадками >1 мм	1961–1990	76	70	83
	1971–2000	66	67	80
Атмосферное давление на уровне станции, ГПа	1961–1990	1014,8	1012,3	1011,6
	1971–2000	972,6	1006,7	1010,2
Упругость водяного пара, ГПа	1961–1990	3,9	4,4	4,6
	1971–2000	3,9	4,5	4,8
Продолжительность солнечного сияния, час	1961–1990	1783	—	1792
	1971–2000	1797	1927	1757
Скорость ветра, м/с	1966–2005	1,7	3,4	4,4
Среднее число дней с ветром >15 м/с	1966–2005	4,9	34,6	56,5
Облачность, балл общая нижняя	1977–2004	6,3	6,7	7,0
		4,3	2,1	4,1
Среднее число ясных дней по нижней облачности	1977–2004	144	162	178
Среднее наибольшая высота снежного покрова за декаду, см	1966–2009	62	34	60
Число дней со снежным покровом	1966–2009	226	204	211

преобладают ветры восточного и северо-восточного направлений, в среднем течении максимум повторяемости приходится на север и северо-восток, а в верховьях к северным румбам добавляется северо-запад.

Количество облаков нарастает по мере продвижения от верховьев к устью реки (табл. 2). Соответственно условиям циркуляции, в годовом ходе минимальное количество облаков наблюдается зимой, а максимум приходится на середину лета. Самая малооблачная погода характерна для среднего течения Пенжины.

Таким образом, в бассейне реки климатические условия значительно изменяются в зависимости от географического положения.

### Тенденции изменения метеорологических параметров

Проанализируем тенденции изменения некоторых метеорологических параметров в связи с описанными выше изменениями основных климатообразующих факторов (радиационных условий, циркуляции атмосферы).

Рассмотрим вначале многолетний ход температуры воздуха на примере данных наблюдений на двух станциях — Верхне-Пенжино и Каменское (рис. 8). Закономерности изменения температурного режима в целом за год на двух станциях практически аналогичны, т. е. формируются главным образом под влиянием макропроцессов. Влияние местных условий проявляется в том, что температурный режим Верхне-Пенжино гораздо более суров (рис. 8А).

До начала 1990-х годов тенденция изменения среднегодовой температуры воздуха практически отсутствует, тогда как в последнее десятилетие XX и первое десятилетие XXI веков отмечается ее заметный рост. В 1996, 2003 и 2007 гг. на станции Каменское аномалии среднегодовых температур (в качестве нормы ис-

пользован базовый период 1961–1990 гг.) превысили  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , хотя до этого были менее  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 8Б). С начала XXI века и по настоящее время отрицательные аномалии не наблюдались. Подобное интенсивное потепление в этот период можно объяснить ростом продолжительности действия южных циклонов, выносивших теплый воздух низких широт в умеренные и высокие широты (увеличение повторяемости долготной южной циркуляции, рис. 6). Современная тенденция изменения температуры воздуха — некоторая стабилизация после резкого повышения в 1981–1998 гг.

О росте продолжительности влияния антициклональной циркуляции свидетельствует и тенденция к увеличению годовой амплитуды температуры воздуха, равной разности между среднемесячной температурой самого теплого и самого холодного месяцев в году. Для Каменского линейный тренд этой величины положителен и статистически значим с уровнем значимости 0,01 (рис. 8В). Хорошо видно, что континентальность климата выражена более значительно в Верхне-Пенжино, чем в нижнем течении реки.

В многолетнем ходе годовых сумм осадков за период 1966–2013 гг. прослеживается уменьше-

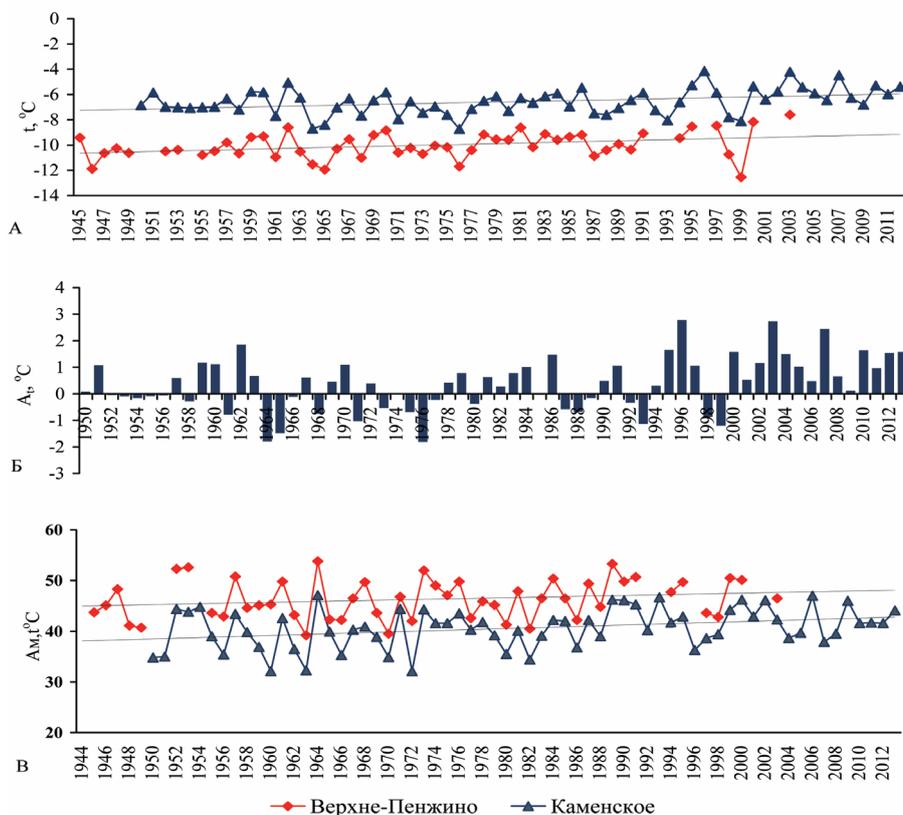


Рис. 8. Многолетний ход среднегодовой температуры воздуха (А), ее аномалии (At) (Б) и амплитуды (Am) (В) на станциях Каменское и Верхне-Пенжино

ние увлажнения территории на фоне квазициклических колебаний (рис. 9). Западные и южные циклоны либо заполнялись по пути и не достигали Пенжины, либо приходили ослабленными и приносили мало осадков (Кононова, 2009). Для региона вообще характерно небольшое количество осадков: в среднем сумма за год — 300–400 мм. Максимум в 1960–1980-е гг. приходится на период увеличения повторяемости меридиональных типов циркуляции и уменьшения — западной (рис. 6). Минимальное количество осадков за год выпало в 1995 г. (резкий рост долготной южной группы циркуляции). В дальнейшем ослабление южных потоков и некоторое усиление зональных процессов обусловили наблюдаемое в последнее десятилетие увеличение осадков.

Значительно уменьшилось среднегодовое давление на ст. Каменское: тренд составил 0,4 ГПа/10 лет,  $R^2 = 0,19$ . Вместе с тем отмечен статистический рост влагосодержания воздуха: 0,1 ГПа/10 лет,  $R^2 = 0,28$ , что говорит о заметном влиянии теплого воздуха, поступающего с южными циклонами.

Анализ тенденций изменения среднемесячной температуры воздуха выявил достаточно неожиданное (на фоне повышения годовых температур) похолодание зимних месяцев, причем если в декабре и феврале оно статистически незначимо, то в январе отрицательный тренд температуры воздуха значим (уровень значимости 0,004) и максимален за год — 1 °C/10 лет (табл. 3, рис. 10А). Впол-

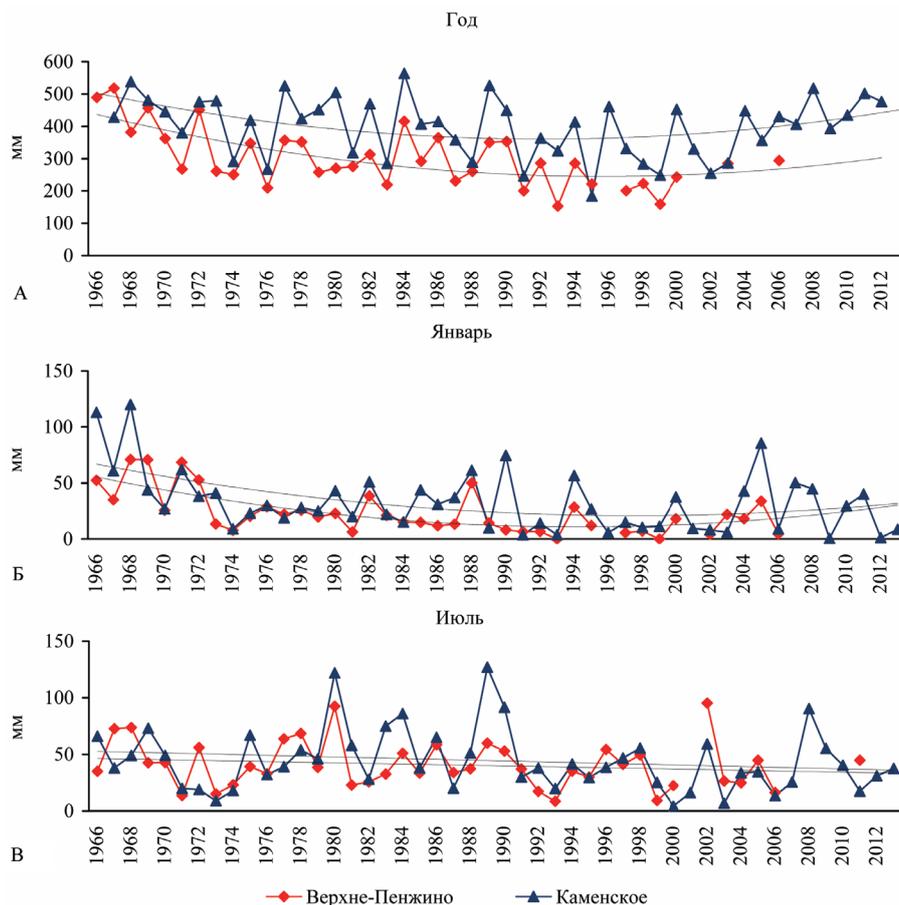


Рис. 9. Многолетняя динамика осадков на станциях Каменское и Верхне-Пенжино

Таблица 3. Средняя за месяц температура воздуха ( $t_m$ ) по данным метеостанции в с. Каменское Пенжинского района Камчатского края с 1950 по 2013 гг.

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Средняя за 1950–2013	-23,1	-22,8	-18,8	-10,7	1,3	10,2	13,6	11,5	5,4	-5,9	-16,6	-22,7
*±ДИ, ( $\alpha = 0,05$ )	1,3	1,2	1,1	0,7	0,5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	1,0	1,2
Средняя за 1961–1990 ( $t_m$ )	-22,3	-22,4	-19,9	-11,6	0,9	10,0	13,2	11,4	5,0	-6,5	-18,1	-22,8
Средняя за 1971–2000	-23,4	-22,0	-19,7	-11,1	1,1	10,2	13,4	11,5	5,2	-5,6	-17,1	-23,4
Средняя за 1981–2010	-24,9	-22,6	-18,1	-10,1	1,8	10,7	13,8	11,7	5,6	-5,0	-15,8	-22,1
максимум	-12,4	-12,7	-7,7	-1,9	4,3	13,1	16,4	13,4	8,4	-0,6	-5,4	-10
год	1969	1994	2002	1954	2013	1991	2010	1995	2010	2012	2012	1983
минимум	-33,5	-32,9	-28,9	-18,4	-4,6	7,4	11,3	8,9	1,4	-12,7	-25	-32
год	1964	2002	1985	1976	1950	1950	1965	1998	1965	1955	1983	1954
V, %	22	20	24	28	145	11	8	9	28	45	25	22
Скорость изменения $t_m$ за 10 лет, $\Delta$ , °C	<b>-1,0</b>	-0,3	+0,5	+0,3	<b>+0,5</b>	<b>+0,2</b>	<b>+0,2</b>	<b>+0,15</b>	+0,2	<b>+0,5</b>	<b>+0,6</b>	-0,3
Значимость линейного тренда	<b>0,004</b>	0,40	0,09	0,10	<b>0,0002</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>	<b>0,04</b>	0,07	<b>0,006</b>	<b>0,03</b>	0,59
Изменение за 64 года ( $Q_{2013}-Q_{1950}$ )/ $Q_{1950}$ , %	-33,0	-7,7	16	17,6	2075	16,2	11,2	8,3	24,5	40,6	20,7	-8,0
Относительная величина тренда за 10 лет: $\beta=(\Delta/t_m)$ %	4,5	1,2	2,8	3,1	35,1	2,4	1,7	1,3	3,5	8,1	3,7	1,3

Примечание. \*ДИ — доверительный интервал среднего значения; жирным шрифтом выделены месяцы со статистически значимыми трендами

не возможно, это связано с увеличением проникновения арктических воздушных масс на фоне уменьшения повторяемости долготной южной циркуляции (рис. 6). Кроме того, и общий радиационный баланс также уменьшается (уровень значимости невысок — 0,23) (рис. 10В).

Рост повторяемости антициклонального типа погоды в январе, а следовательно, и выхолаживания зимой, обусловил значимую отрицательную тенденцию (уровень значимости 0,0004) в многолетнем ходе максимальной за сутки температуры воздуха (рис. 10Б). Например, средняя  $t_{max}$  за период 1950–1980 гг. — около  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , тогда как за последующие 30 лет она стала ниже на  $5^{\circ}\text{C}$ . При этом, по данным реанализа, в регионе существенно уменьшается общая облачность (тренд составил примерно 1 балл за 35 лет с уровнем значимости 0,10). Наблюдения говорят о статистически незначимом росте среднего давления за январь (0,8 ГПа за 10 лет, уровень значимости 0,23) и продолжительности солнечного сияния (3 часа/10 лет,  $R^2 = 0,06$ ). Анализ тенденции изменения влагосодержания воздуха показал значимое его уменьшение зимой (для января 0,1 ГПа/10 лет,  $R^2 = 0,14$ ). Хорошо согласуется с данной схемой и изменение сумм осадков за

месяц. Наиболее заметно уменьшение выпадения осадков, главным образом, в холодное время года, причем в январе–феврале линейный тренд значим с уровнем значимости 0,03 (табл. 4).

Летние температуры, наоборот, на фоне квазициклических изменений имеют статистически значимую тенденцию к повышению (рис. 11А). Летом поле температуры в регионе более однородно, чем в холодное время года. Максимальные суточные температуры воздуха также имеют тенденцию к

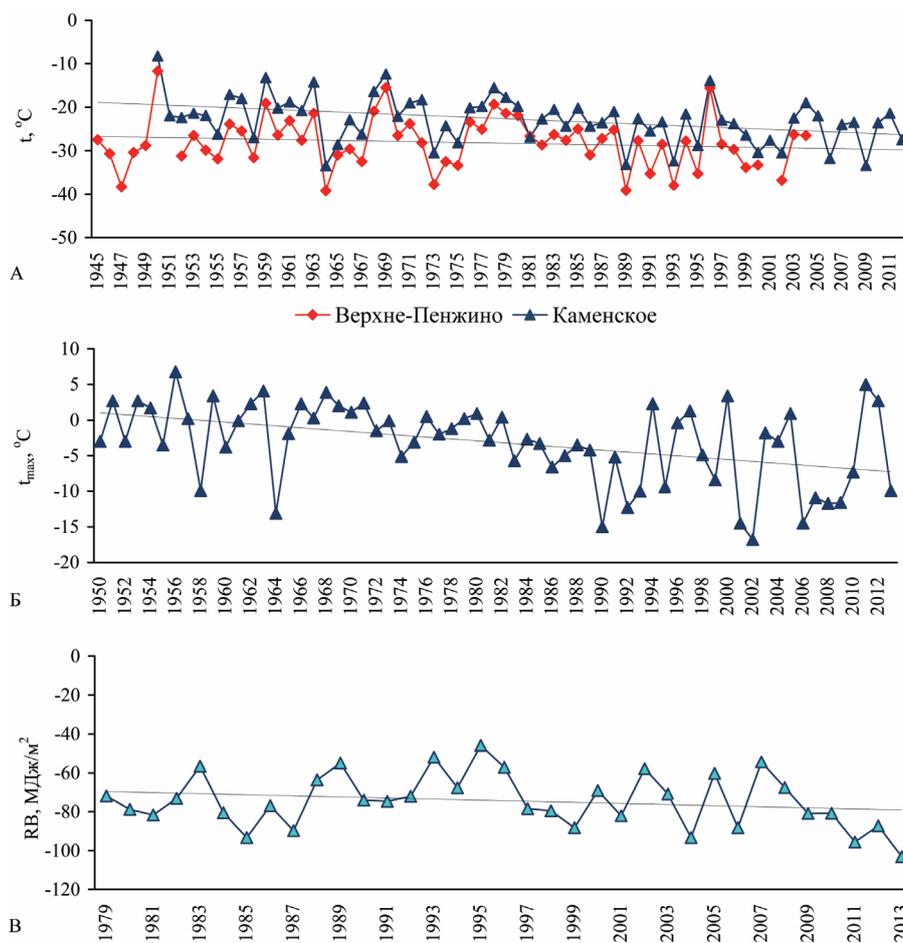


Рис. 10. Многолетний ход средней за месяц (А) и максимальной за сутки (Б) температуры воздуха и общего радиационного баланса (В) в январе на метеостанциях Пенжинского района

Таблица 4. Месячные суммы осадков по данным метеостанции в с. Каменское Пенжинского района Камчатского края с 1966 по 2013 гг.

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Средняя за 1966–2013	32,7	28,1	23,9	19,1	17,5	32,3	44,4	64,1	48,1	32,0	34,1	30,7
±ДИ ( $\alpha=0,05$ )	7,1	5,9	5,3	3,9	3,6	7,0	7,9	8,7	9,3	4,6	6,9	6,6
Средняя за 1971–2000	29,0	25,7	20,8	20,3	15,1	29,2	46,5	62,0	45,8	29,6	33,9	29,1
Средняя за 1981–2010	27,9	19,7	20,4	16,8	17,2	28,0	44,8	65,0	41,1	32,4	29,8	32,0
максимум	120	80	73	59	54	122,2	127	169,9	154,3	77,7	152	102
год	1968	1980	1982	1978	2006	2012	1989	2011	2000	1989	1973	1984
минимум	0,6	1,2	1	2	1	3	4,3	9,8	6,1	7,7	5,6	1
год	2009	2005	1973	1974	1966	1983	200	1991	2009	2002	2002	1976
V, %	75	73	76	71	72	75	61	47	67	50	70	74
Скорость изменения осадков за 10 лет, мм	-5,7	-5,0	-2,2	-1,1	+0,7	+1,9	-3,5	+4,1	-1,8	+2,1	-1,9	+1,0
Значимость линейного тренда	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	0,25	0,42	0,58	0,45	0,22	0,19	0,60	0,20	0,46	0,69

Примечания: те же, что и к таблице 3

повышению за последние 65 лет, но значительно слабее выраженную по сравнению с  $t_{\max}$  января (рис. 10Б, 11Б). Например, за период 1950–1980 гг. средняя  $t_{\max} = 25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а за период 1981–2013 гг.  $t_{\max} = 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (тренд  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет, уровень значимости 0,12). Это хорошо соответствует положительной тенденции изменения общего радиационного баланса земной поверхности (рис. 11В), и соответствует динамике повторяемости разных типов циркуляции (рис. 6). Поступление более теплого и влажного воздуха с южными циклонами обусловили уменьшение среднего за месяц давления воздуха (в июле тренд составил  $-0,4$  ГПа/10 лет,  $R^2 = 0,09$ ), заметный рост его влагосодержания ( $0,3$  ГПа/10 лет,  $R^2 = 0,27$ ). Это также объясняет и увеличение сумм осадков, характерное именно для теплого времени года, хотя статистически оно и незначимо (табл. 4).

Заметно потепление и осенних месяцев (табл. 3), а наиболее значителен положительный тренд температуры весной. Рост температуры воздуха отмечен в девяти месяцах из двенадцати, что и обусловило ее рост в целом за год.

Тенденция к уменьшению количества месячных осадков прослеживается в семи месяцах из двенадцати, однако статистически значима она

только в январе–феврале (табл. 4). В мае–июне, августе, октябре и декабре, наоборот, за последние полвека количество осадков несколько возросло, хотя линейный тренд в эти месяцы статистически незначим. В итоге в целом за год суммы осадков имеют тенденцию к уменьшению с уровнем значимости 0,18.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наземные наблюдения, как и данные реанализа, свидетельствуют о наличии в бассейне Пенжины статистически значимых тенденций к потеплению и уменьшению поступления осадков. В XXI веке уменьшается суммарная годовая продолжительность южных циклонов, что сопровождается быстрым ростом продолжительности блокирующих процессов в азиатской части континента зимой и летом. Это приводит к увеличению годовой амплитуды температуры воздуха за счет уменьшения положительных январских аномалий при высоких температурах в июле. Иными словами, в настоящее время характер атмосферной циркуляции на севере Дальнего Востока меняется, что отражается и в изменениях погоды. Возрастает роль антициклонов в зимнее время,

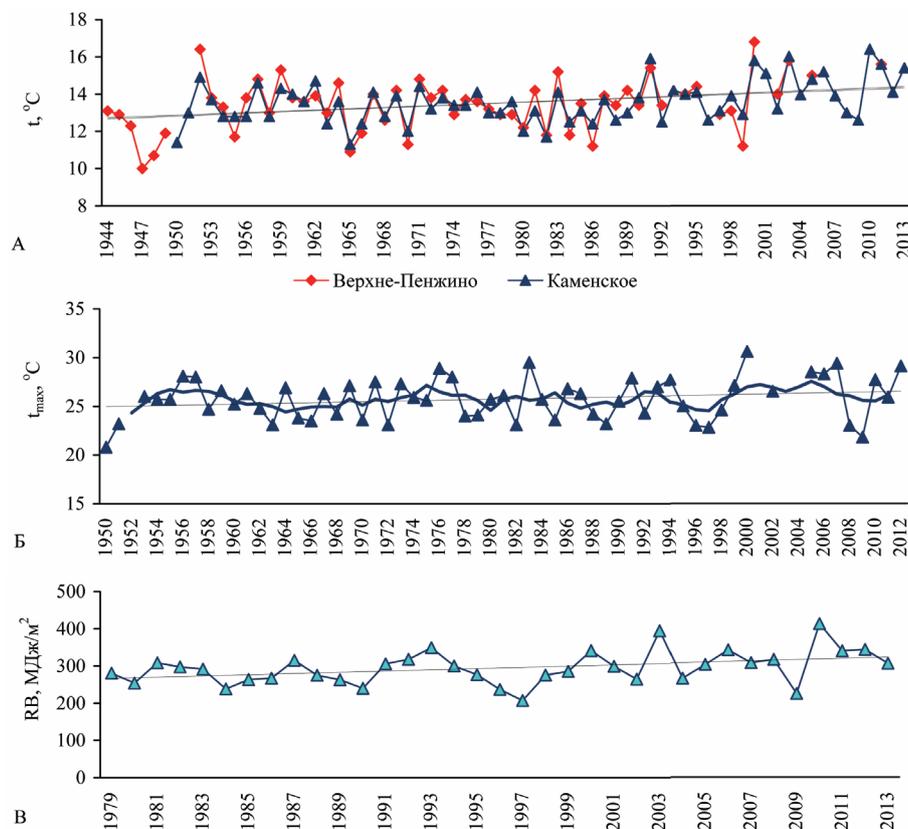


Рис. 11. Многолетний ход средней за месяц (А) и максимальной за сутки (Б) температуры воздуха и общего радиационного баланса (В) в июле на метеостанциях Пенжинского района

что говорит об увеличении континентальности климата Пенжинского района. При этом потепление происходит на фоне уменьшения годовой суммы радиационного баланса, рассчитанного на основе реанализа ERA Interim, что может говорить об изменениях соотношения главных климатообразующих факторов — радиационного и циркуляционного, в формировании климата в последние полвека. Использование для климатических реконструкций реанализа требует учета погрешностей при расчете абсолютных величин параметров.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны всем участникам экспедиции 2014 г. на р. Пенжине,

а также местным жителям за помощь в проведении полевых работ.

Работы поддерживаются РФФИ (проекты № 14-05-00549, 14-05-00510, 14-05-10043).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дзердзеевский Б.Л.* 1968. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // Матер. метеорологических исследований. М.: ИГ АН СССР и Междувед. геофиз. комитета при Президиуме АН СССР. 240 с.
- Дзердзеевский Б.Л.* 1970. Сопоставление характеристик атмосферной циркуляции над Северным полушарием и его секторами / Матер. метеорологических исследований. М.: ИГ АН СССР и Междувед. геофиз. комитета при Президиуме АН СССР. С. 7–14.
- Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.* 1946. Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. науч.-исслед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. М.-Л.: Гидрометиздат. 80 с.
- Кононова Н.К.* 2009. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / Отв. ред. А.Б. Шмакин. М.: Воентехиниздат. 372 с.
- Кононова Н.К.* 2015. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. № 1. С. 127–156.
- Кондратюк В.И.* 1974. Климат Камчатки. М.: Гидрометеоздат. 204 с.
- Кондратюк В.И.* 1983. Климат Петропавловска-Камчатского. Л.: Гидрометеоздат. 167 с.
- Климат России. 2011. Научно-прикладной справочник. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». [Электронная версия]: <http://aisori.meteo.ru/ClspR>. Дата доступа: 30.05.2015.
- Шкаберда О.А., Василевская Л.Н.* 2013. Оценка изменений температуры воздуха на Камчатке за последние 60 лет // Вестник ДВО РАН. № 3. С. 69–77.
- Шкаберда О.А., Василевская Л.Н., Устинова Е.И.* 2014а. Режим и динамика приземного ветра на Камчатке и его связь с индексами Блиновой и берингоморским // Естественные и технические науки. № 4. С. 86–94.
- Шкаберда О.А., Василевская Л.Н., Ковбасюк В.В.* 2014б. Режим и динамика атмосферных осадков на Камчатке во второй половине XX – начале XXI века // Естественные и технические науки. № 4. С. 76–85.
- Шкаберда О.А.* 2014. Многолетняя изменчивость температурно-влажностного режима на полуострове Камчатка // Изв. Тихоокеан. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. Т. 178. С. 217–233.
- Dee D.P., Uppala S.M. et al.* 2011. The ERA-Interim Reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. V. 137. P. 553–597.