

УДК 551.582.2

**АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО
ПОКРОВА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ ЗА 1966–2014 гг.**

Л.Н. Василевская, Ю.В. Сточкуте

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, 690950, Россия

Аннотация

В работе исследованы режим и динамика годовых и сезонных сумм атмосферных осадков на северо-востоке России (Чукотский АО, Магаданская область, восточная часть Якутии) по данным наблюдений на 26 метеорологических станциях за период 1966–2014 гг. Проанализирована также зависимость динамической изменчивости высоты снежного покрова от количества осадков на четырех станциях. Показано, что объем атмосферных осадков за год уменьшается на большей территории по сравнению с высотой снежного покрова. Весна и лето вносят основной вклад в это уменьшение, особенно с середины 80-х годов двадцатого столетия. При этом установлено, что характер изменения высоты снежного покрова в основном не согласуется с изменением количества выпадающих твердых осадков, особенно на западе и юге рассматриваемой территории.

Ключевые слова: атмосферные осадки, снежный покров, статистический анализ, оценка трендов, корреляционный анализ

Введение

Согласно данным Второго оценочного доклада [1] на большей части Российской Федерации (по стационарным временным рядам годовых и сезонных аномалий осадков за 1976–2012 гг.) выявлена тенденция к росту атмосферных осадков (5% / 10 лет), за исключением отдельных областей Сибири и Дальнего Востока. На севере же Чукотки обнаруживается убывание годовых, летних и зимних сумм осадков (около 5% / 10 лет). Линейные тренды осредненных по территории Восточной Сибири (в этот регион входит и северо-восток России) сумм осадков за другой, более продолжительный период (1936–2010 гг.) свидетельствуют о практически круглогодичном (кроме зимы) уменьшении сезонных и годовых сумм осадков. Лишь на северо-востоке данной территории наблюдается положительная тенденция (до 100% от нормы). Противоположные результаты анализа изменения количества атмосферных осадков на северо-востоке России связаны с разными периодами исследования.

В оценочном докладе говорится об увеличении другого важного показателя климатической системы, а именно максимальной и средней за зиму высоты снежного покрова (данные за 1966–2012 гг.) на Чукотке и в северной части Восточной Сибири [1]. Продолжительность залегания снежного покрова также увеличилась на побережье Охотского моря, на остальной части северо-востока

России в последние годы при резких межгодовых колебаниях преобладают поздние даты установления и ранние даты схода снежного покрова [2].

Цель настоящей работы – анализ межгодовой изменчивости количества атмосферных осадков и высоты снежного покрова на северо-востоке России (Чукотский АО, Магаданская область, восточная часть Якутии) за 1966–2014 гг. В связи с этим в задачи исследования входило изучение режима атмосферных осадков, скорости и характера их изменения, а также выявление связей между высотой снежного покрова и количеством осадков.

1. Результаты и их обсуждение

1.1. Материалы и методы. В качестве исходного материала использованы ежемесячные суммы атмосферных осадков на 26 метеорологических станциях с 1966 по 2014 г. и ежедневные данные высоты снежного покрова на четырех станциях: Островное ($\varphi = 68^{\circ}07'$, $\lambda = 164^{\circ}10'$), Марково ($\varphi = 64^{\circ}41'$, $\lambda = 170^{\circ}25'$), Магадан ($\varphi = 59^{\circ}33'$, $\lambda = 150^{\circ}47'$), Омолон ($\varphi = 65^{\circ}14'$, $\lambda = 160^{\circ}32'$) за период 1966–2012 гг. (рис. 1). Данные взяты с сайта Мирового метеорологического центра ВНИГМИ-МЦД (www.meteo.ru). По ежедневным данным выбирались декадные максимумы за весь снежный период. За ежемесячную высоту снежного покрова в настоящей работе принималась максимальная зарегистрированная величина в третью декаду каждого месяца.

Для выполнения поставленной цели все исходные ряды подвергались статистической обработке, строились тренды их временного изменения (определены коэффициенты наклона (a) линейных трендов, значимость которых оценивалась по коэффициенту детерминации (R^2) на уровне доверительной вероятности 95%). Находились также корреляционные связи между атмосферными осадками и высотой снежного покрова.

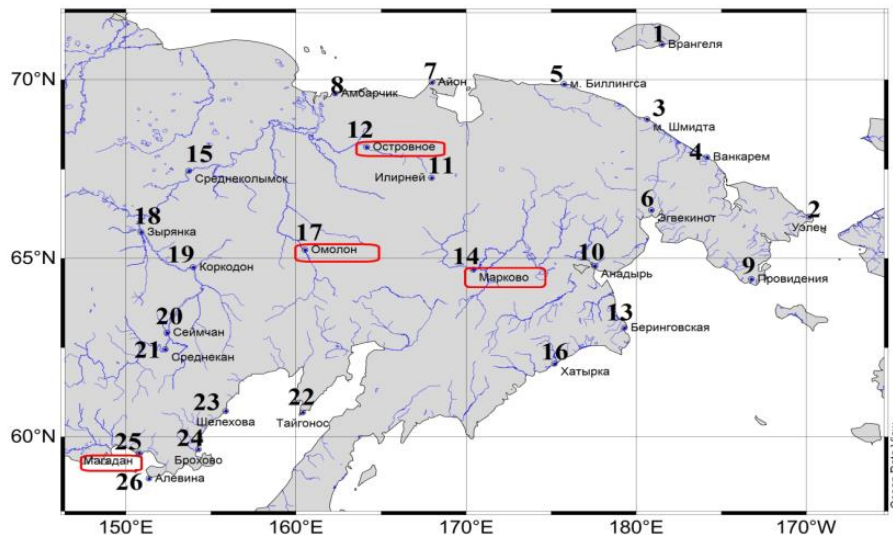


Рис. 1. Карта-схема расположения метеорологических станций (в рамках выделены станции, на которых проводились наблюдения за снежным покровом)

Пространственно-временное распределение атмосферных осадков, их аномалий, а также скорости их изменения анализировались с помощью карт, построенных в пакете программы Surfer.

1.2. Режим осадков. Почти вся изучаемая территория входит в избыточно влажную зону с суровой малоснежной зимой на севере региона, суровой снежной зимой на континенте и умеренно суровой снежной зимой на юге и востоке. Западная часть территории является умеренно-влажной с суровой снежной зимой [3]. Климат материковой части исследуемого региона отличается резкой континентальностью [4], а климат прибрежных районов относится к муссонному с морскими чертами [5].

Режим увлажнения северо-востока России определяется разнообразными и сложными синоптическими процессами, которые являются следствием циркуляционных механизмов над Арктикой, Дальним Востоком и северной частью Тихого океана. Атмосферные процессы часто формируются на фоне антициклонального барического поля, в структуре которого в осенне-зимний период выделяется отрог сибирского антициклона, а в весенне-летний период – арктический антициклон. Циклонические же вихри различного географического происхождения обычно завершают свой жизненный цикл над территорией. На эти процессы, в свою очередь, оказывают влияние разнородные термические условия подстилающей поверхности восточных арктических и дальневосточных морей и сложный характер рельефа Чукотки [6].

Проведенный статистический анализ показал, что все исследуемые ряды количества осадков являются представительными для генеральных совокупностей, поскольку относительные ошибки среднего не превышают 6%, стандартного отклонения и коэффициента вариации – 11%, коэффициента асимметрии – 30% [7]. Эмпирические выборки тестировались на близость к нормальному распределению с применением правила трех сигм и критерия «С», представляющего собой отношение размаха колебаний к стандартному отклонению временного ряда [8].

Выяснилось, что правило трех сигм выполняется в 70% рядов, а значение критерия «С» находится между верхней и нижней критическими границами практически во всех рядах. Таким образом, распределение большей части выборок близко к нормальному закону.

Пространственное распределение сезонных (сумма за три календарных месяца) и годовых сумм осадков представлено на рис. 2. Для зимы характерно меридиональное распределение осадков – повышенное количество на юго-востоке и юго-западе (60–150 мм) и пониженное на северо-западе, севере, северо-востоке и в центральной части региона (30–50 мм). Очаги наибольших значений связаны с активной циклонической деятельностью над Охотским и Беринговым морями. Начиная с весны изогипсы постепенно принимают зональный характер, хотя наибольшие (50–80 мм) и наименьшие (20–40 мм) значения количества осадков отмечаются в тех же районах. Летом пространственное распределение осадков наиболее близко к зональному. Область пониженного количества осадков (70–110 мм) сдвигается к арктическому побережью, а повышенного (120–150 мм) приходится на широтно-ориентированную по югу региона зону. Имеется также очаг наибольшего количества осадков на юго-востоке

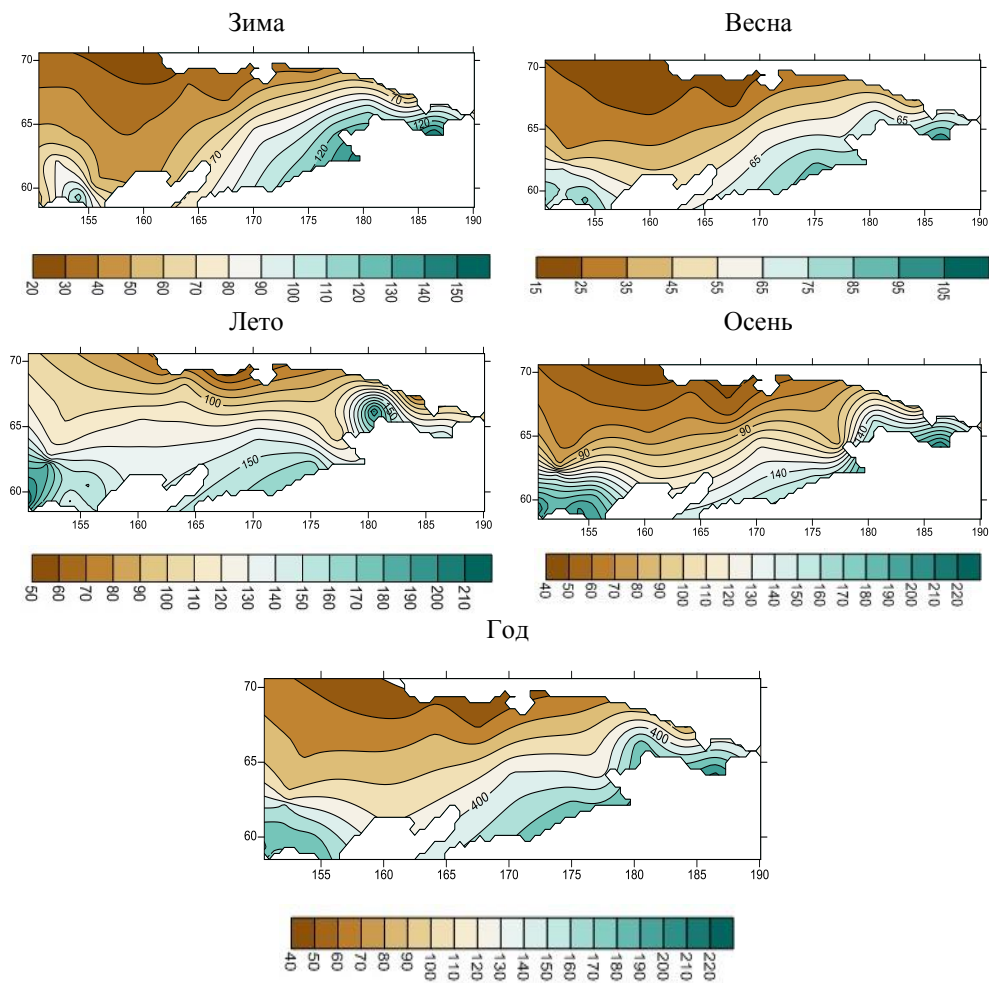


Рис. 2. Пространственное распределение средних многолетних сезонных и годовых сумм осадков (1966–2014 гг.)

территории (до 180 мм). Это связано с влиянием чукотской ветви арктического атмосферного фронта, на котором образуются циклоны [6]. Такая картина распределения осадков сохраняется и осенью, лишь с той разницей, что на арктическом побережье осадков выпадает меньше (60–90 мм), чем летом. В целом годовое количество осадков изменяется по территории от 100–300 мм на арктическом побережье до 400–600 мм на побережьях Охотского и Берингова морей с наибольшим увлажнением в теплое время года, а с наименьшим – в холодное.

При исследовании закономерностей внутригодового хода количества атмосферных осадков выделены четыре района с различными типами (рис. 3). В северном районе минимальные суммы атмосферных осадков отмечены в марте – апреле, а максимальные – в июле – августе. В континентальном районе минимальное количество осадков выпадает также весной (апрель); основной максимум приходится на июль – август, а вторичный – на ноябрь. В южном районе отмечается равномерное как увеличение, так и уменьшение сезонных осадков (от минимума в феврале до максимума в августе). В отличие от других районов,

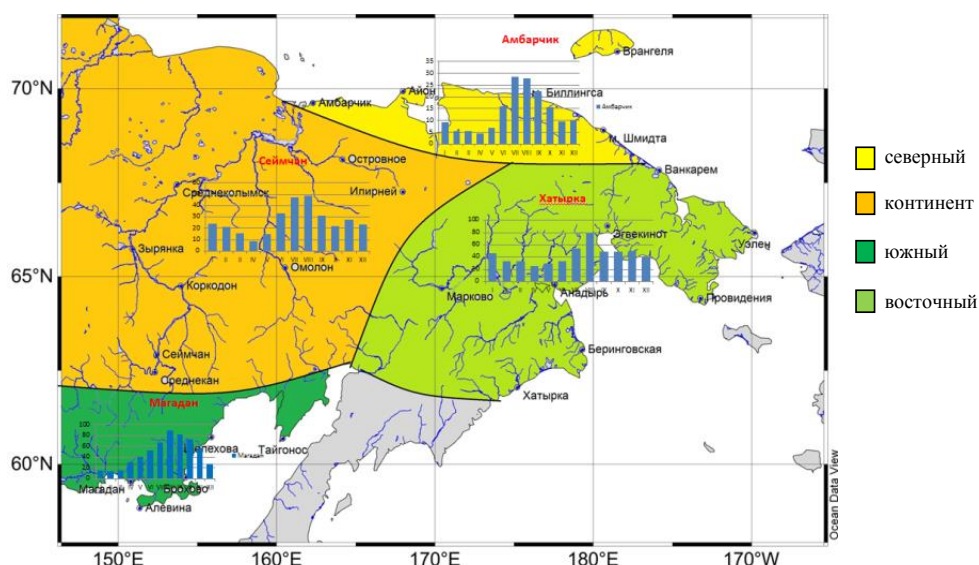


Рис. 3. Годовой ход количества осадков в различных районах

на востоке территории наблюдается сглаженный ход количества атмосферных осадков, на фоне которого выделяется относительный минимум в апреле – мае, а максимум – в августе.

Временная изменчивость атмосферных осадков, которая характеризуется средним квадратическим отклонением (СКО), имеет хорошо выраженный годовой ход, повторяющий внутригодовые изменения самих средних многолетних сумм атмосферных осадков. Так, за исключением отдельных прибрежных станций (Ванкарем, м. Провидения, Беринговская и Брохово, на которых максимумы обоих показателей отмечаются осенью), максимумы в годовом ходе средних многолетних значений и СКО приходятся на июль – август. Минимальные значения СКО в северном районе отмечаются в марте – апреле, на континенте – в апреле – мае, на востоке – в апреле – июне, а на юге территории – зимой. Таким образом, в годовом ходе наибольшая изменчивость количества осадков выявлена в летние месяцы (июль – август) практически по всей территории, а минимальная характерна для весны и начала лета (исключением является южный район с наименьшим СКО зимой).

Коэффициент вариации (C_V), в отличие от СКО, отражает действительную межгодовую изменчивость метеопараметра, поскольку является относительным показателем. В среднем по территории значения СКО укладываются в диапазон 60–80% относительно средних многолетних сумм атмосферных осадков. Наименее подвержены межгодовым изменениям летние осадки, а также осадки октября на побережьях и осадки февраля в континентальной части ($C_V = 40\text{--}50\%$). Наиболее изменчивы в межгодовом масштабе осадки холодного периода года ($C_V = 70\text{--}100\%$). СКО превышают средние многолетние значения в 1.5 и 2 раза на о. Врангеля и в дельте Колымы соответственно.

Для выявления однотипности межгодового изменения годовых сумм осадков проводился корреляционный анализ, результаты которого показывают, что

Табл. 1

Количество сезонных сумм осадков (мм), соответствующее классу «нормы», на отдельных станциях

Класс	Станция						
	Эгвекино́т	Амбарчик	Островное	Марково	Омолон	Зырянка	Магадан
Зима							
Норма	87–130	20–30	34–51	69–103	33–50	39–58	45–68
Весна							
Норма	56–84	13–20	21–32	47–70	22–33	28–41	69–104
Лето							
Норма	162–243	58–87	83–124	110–165	99–149	101–151	167–251
Осень							
Норма	122–183	38–57	51–77	95–142	57–85	62–93	169–254

пространственные связи в поле осадков в большинстве случаев отсутствуют: коэффициенты корреляции (r) меняются в целом от 0.15 до 0.25. Однако выделяются отдельные районы, где имеются связи между суммами атмосферных осадков на соседних станциях. К ним относятся бассейн нижнего и среднего течения р. Колымы ($r = 0.4–0.7$); правобережье нижнего течения р. Колымы ($r = 0.5$); побережья Чукотского ($r = 0.6$), Берингова ($r = 0.4–0.6$) и Охотского морей ($r = 0.4–0.7$). Все это свидетельствует о неоднородности циркуляционных процессов и значительном влиянии орографии изучаемого региона на режим осадков. Примечательно, что атмосферные осадки в районе ст. Марково отражают режим увлажнения на изучаемой территории, так как они наиболее тесно связаны ($r = 0.72$) со средним по территории количеством осадков.

Структура межгодовых колебаний сезонных и годовых сумм осадков исследовалась путем расчета повторяемости трех классов осадков: класс «нормы» составляет от 80% до 120%, «ниже нормы» – менее 80%, «выше нормы» – более 120% относительно среднего многолетнего значения [9]. В табл. 1 помещены градации класса «нормы» на некоторых станциях, отражающих режим осадков отдельных районов территории.

Зимой количество осадков класса «норма» варьирует на арктическом побережье от 20 до 67 мм, на континенте от 33 до 99 мм, на побережье Берингова и Охотского морей от 30 до 140 мм. Весной количество осадков в пределах этого класса составляет 13–45 мм на арктическом побережье, 22–73 мм в материковой части, 25–105 мм на побережьях Берингова и Охотского морей. Летом величина данного параметра на арктическом побережье изменяется в диапазоне 37–110 мм, на континенте – 87–218 мм, на побережье Берингова моря – 37–243 мм и на побережье Охотского моря – 108–251 мм. Осенью осадконакопление в данном классе варьирует следующим образом: на арктическом побережье 36–183 мм, на континенте 52–157 мм, на побережье Берингова моря 37–214 мм, на побережье Охотского моря 100–254 мм. Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что классу «ниже нормы» соответствует количество осадков меньше нижнего предела, а классу «выше нормы» – больше верхнего значения.

На рис. 4 представлена повторяемость каждого из трех классов сезонных и годовых осадков на исследуемых станциях.

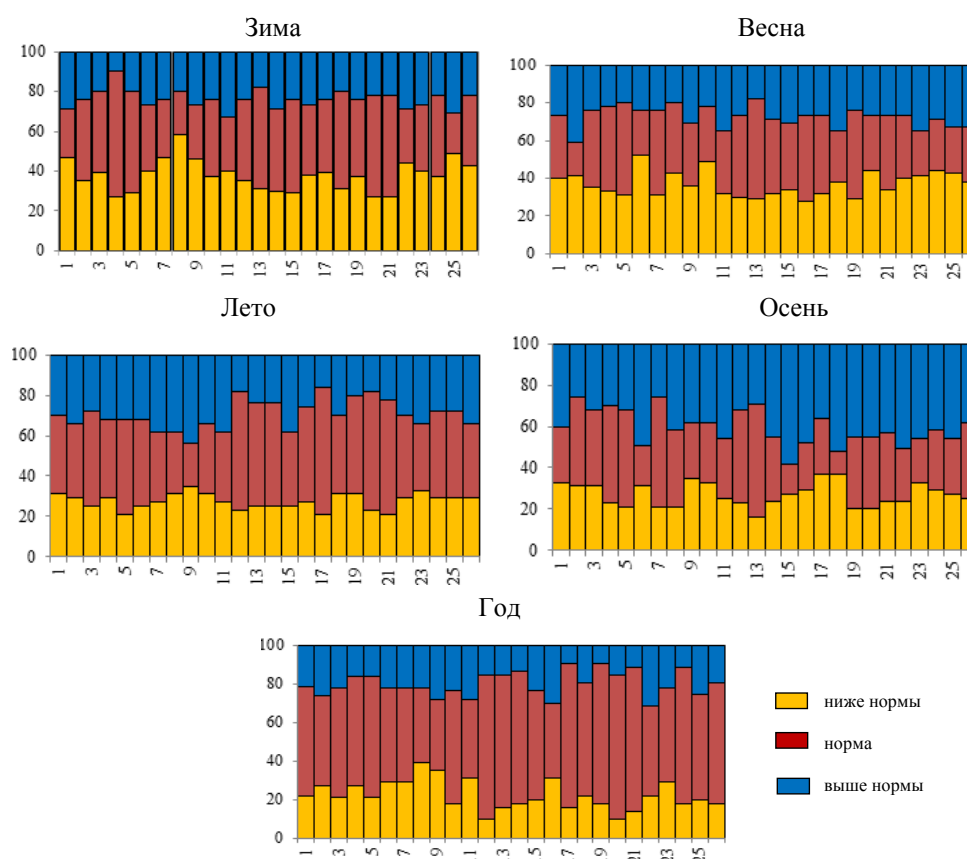


Рис. 4. Повторяемость трех классов сезонных и годовых осадков на станциях. Горизонтальная ось – нумерация станций согласно рис. 1

Рассматривая пространственное распределение трех классов зимних осадков, можно отметить равную долю засушливых летних периодов и летних периодов с нормальным количеством осадков практически по всей территории, исключая юго-запад региона, где преобладают осадки класса «ниже нормы». Похожая картина соотношения избытка и дефицита атмосферных осадков наблюдается и весной. Летние осадки отличаются преобладанием класса «норма» (особенно для континентальной части (57–63%)), за исключением района бухты Провидения, где повторяемость этого класса является минимальной (21%). Осенью повторяемость класса осадков «выше нормы» наибольшая почти на всей территории (42–58%), кроме северного и восточного побережья, где класс осадков «норма» составил больший процент в исследуемом периоде (53–55%). Итак, на большинстве станций зимой и весной преобладают осадки класса «ниже нормы», летом – класса «норма», а осенью – «выше нормы». Для годовых осадков чаще отмечается класс «норма», то есть дефицит количества осадков зимой и весной компенсируется избытком последних осенью.

Атмосферные осадки в зависимости от меняющегося температурного режима и циркуляционных условий подвержены значительным колебаниям [10]. Структуру этих колебаний можно проследить по межгодовому ходу аномалий месячных сумм осадков, определенных в центральные месяцы сезонов (рис. 5).

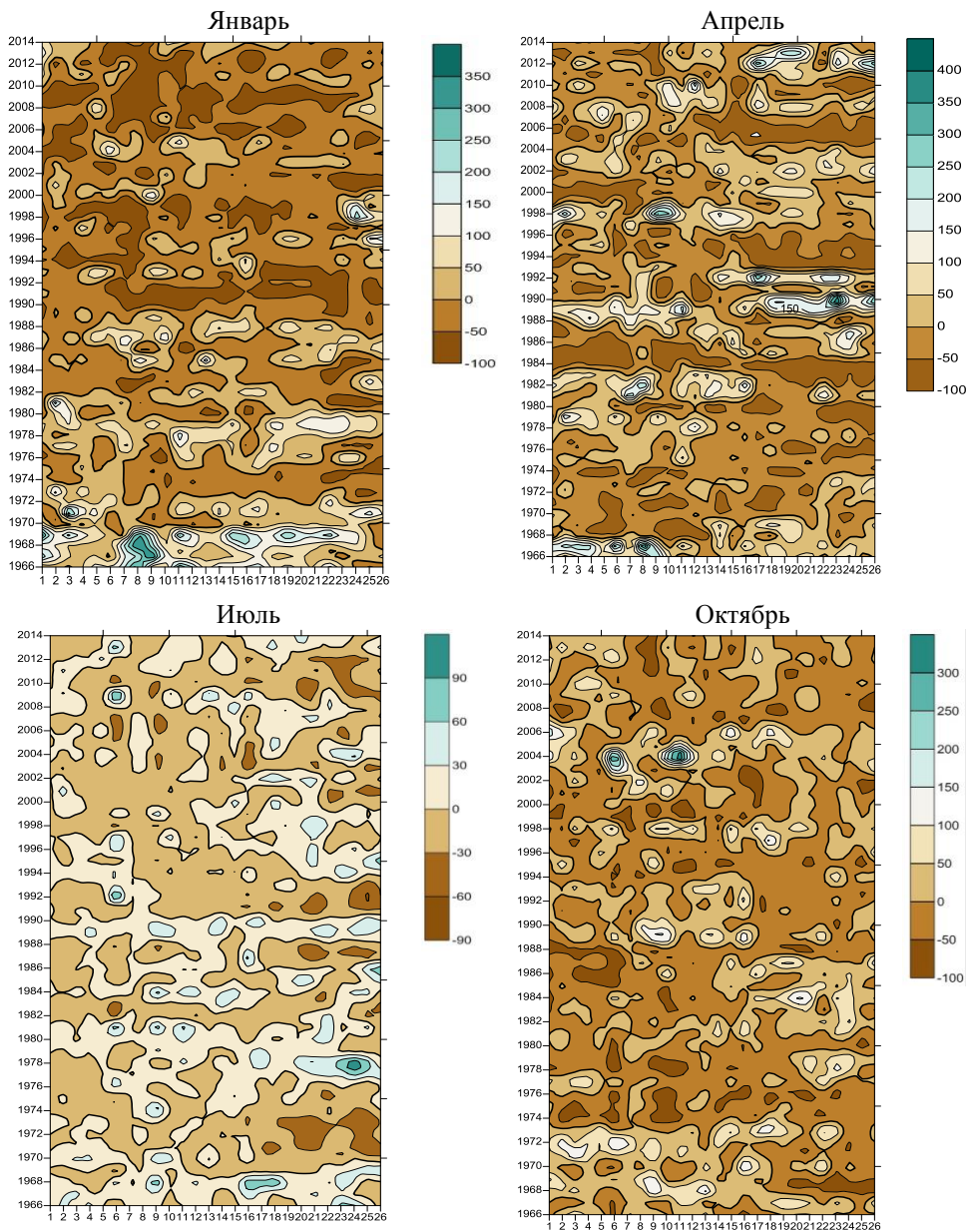


Рис. 5. Пространственно-временное распределение аномалий (в процентах относительно нормы) количества осадков (вертикальная ось – годы, горизонтальная ось – нумерация станций согласно рис. 1)

Январь. Наиболее «сухой» январь по всей территории наблюдался в 1990–1992 гг. и в 2008–2010 гг. (отсутствие осадков), а самый «влажный» – в 1966–1969 гг. (более чем в 2 раза выше нормы), 1978–1979 и 1988 гг. (в 2 раза выше нормы). На северо-восточном побережье избыток количества осадков пришелся: на начало исследуемого периода – 1966–1970 гг. (в 2–3 раза выше нормы); на 1973, 1977–1981 гг. (в 2 раза выше нормы) и на 2014 гг. (в 1.5 раза выше нормы). На побережье Охотского моря в 1996–2000 гг. осадки превышали норму в 2 раза. Избыток и дефицит осадков обусловлены характером пространственного

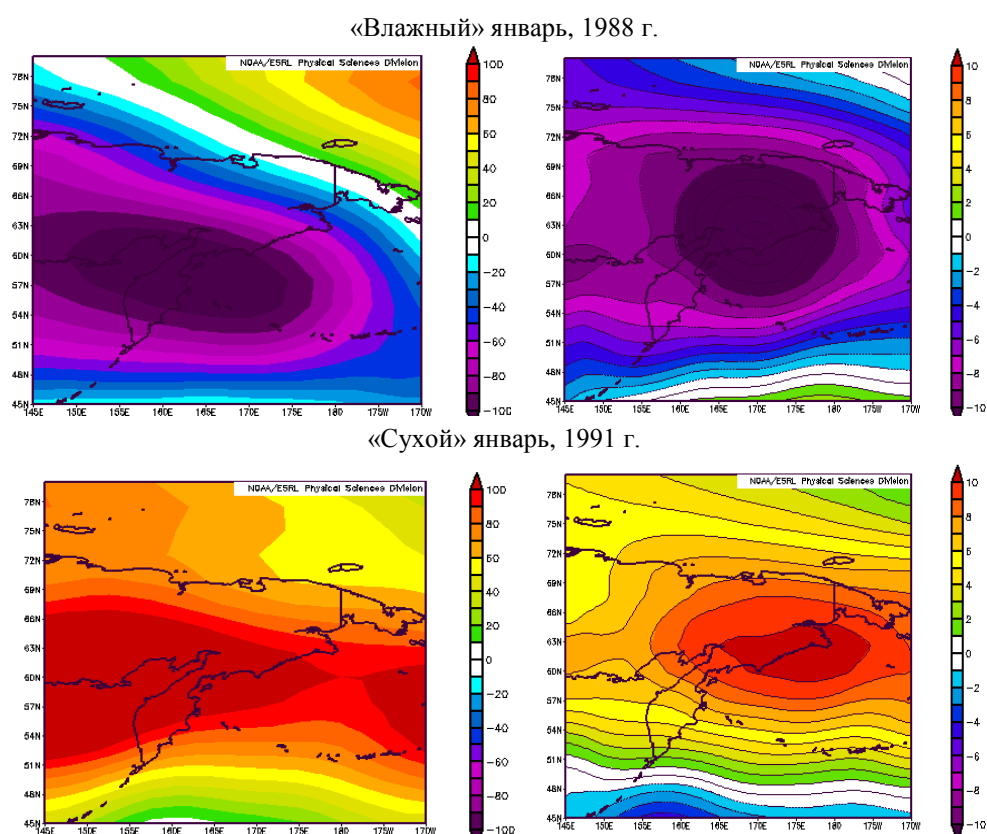


Рис. 6. Распределение аномалий атмосферного давления на уровне моря и геопотенциала на H500 в январе 1988 и 1991 гг. Ось абсцисс – долгота от 145° в.д. до 170° з.д., ось ординат – широта от 45° с.ш. до 75° с.ш.

распределения аномалий давления на уровне моря и геопотенциала в средней тропосфере (500 гПа) (см. рис. 6). Наличие аномально высокого давления (+6...+9 гПа) в сочетании с развитым высотным гребнем (+7...+10 дкм) создает условия для дефицита осадков в январе 1991 г., а влияние алеутской депрессии (–8...–10 гПа) – для избытка осадков в январе 1988 г. Аномалии по данным NCEP/NCAR-реанализа рассчитаны относительно базового периода 1981–2010 гг.

Апрель. Самый засушливый период на всей территории отмечался в 1984–1985 гг. (рис. 7). В континентальном районе и на побережье Охотского моря апрели с отсутствием осадков пришлось на 1993–1995 гг. и 2005–2007 гг. Что касается аномально «влажного» апреля, то на всей территории он наблюдался в 1988–1990 гг. (в 2 раза выше нормы, а на побережье Охотского моря – в 4 раза). Избыток осадков выявлен в отдельных районах в разные годы: на севере и северо-востоке – в 1966–1967 гг., на севере – в 1981–1982 гг. в континентальной части и на Охотском побережье – в 1992 и 2011–2014 гг. (в 3–4 раза выше нормы). На отдельных станциях севера, востока и континентальной части территории в 1998 г. количество осадков было в 2–3 раза выше нормы. На рис. 7 представлены приземные поля атмосферного давления с доминирующим гребнем сибирского антициклона в «сухом» апреле 1984 г. и господствующей ложбиной алеутского минимума во «влажном» апреле 1988 г.

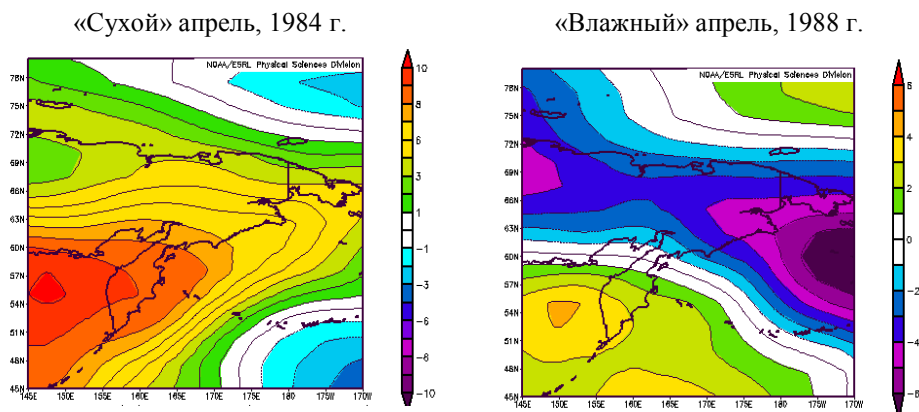


Рис. 7. Распределение аномалий атмосферного давления на уровне моря в апреле 1984 и 1988 гг. Ось абсцисс – долгота от 145° в.д. до 170° з.д., ось ординат – широта от 45° с.ш. до 75° с.ш.

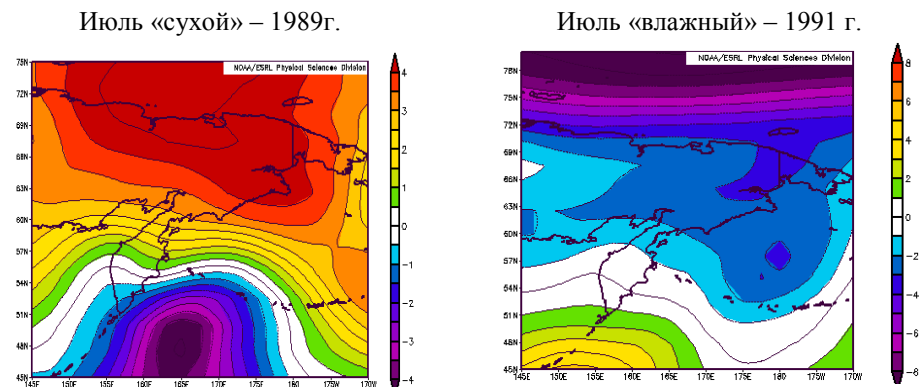


Рис. 8. Распределение аномалий атмосферного давления на уровне моря в июле 1989 и 1991 гг. Ось абсцисс – долгота от 145° в.д. до 170° з.д., ось ординат – широта от 45° с.ш. до 75° с. ш.

Июль. В июле осадки в основном близки к норме. Засушливый июль выявлен преимущественно на Охотском побережье в 1971–1973 гг., 1987 г., 1991–1993 гг., 2003 г., 2009–2012 гг. (в 1.5 раза ниже нормы). «Влажный» июль на большинстве станций наблюдался в 1967, 1980 и 1989 гг. (в 1.5 раза больше нормы). Осадки, превышающие норму в 2 раза, отмечались на побережье Охотского моря в июле 1978 г. Преобладание положительных аномалий приземного давления в 1991 г. (+2...+4 гПа), то есть влияние гребня арктического антициклона, способствовало минимальному количеству осадков за этот год по всей территории, а влияние циклонов, формирующихся на чукотской ветви арктического атмосферного фронта [6], отразилось на аномально высоком количестве осадков в 1989 г. (рис. 8).

Октябрь. Периоды 1974–1976 гг. и 2007–2008 гг. оказались экстремально сухими для всего региона в целом (в 2 раза меньше нормы). В отдельных районах «сухим» был октябрь в 1967–1968 гг. (Охотское побережье), в 1978–1979 гг. (северо-восток), в 1999–2000 и 2008–2014 гг. (север), в 1986–1988 гг. и 2008 г. (восток) и в 2000–2003 гг. (континентальная часть территории). Этот месяц примечателен большим количеством влажных лет: в 1967–1968 гг. суммы осадков

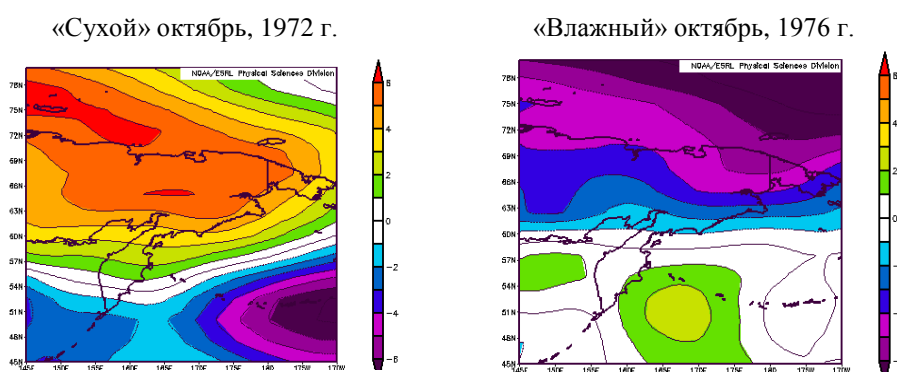


Рис. 9. Распределение аномалий атмосферного давления на уровне моря в октябре 1972 и 1976 гг. Ось абсцисс – долгота от 145° в.д. до 170° з.д., ось ординат – широта от 45° с.ш. до 75° с.ш.

вдвое выше нормы прослеживались на некоторых станциях севера и северо-востока территории. Наиболее влажными в пространственном распределении были 1971–1972 гг. – осадки более чем в 2 раза выше нормы характерны для всей территории. В 1976–1979, 1981–1985 гг. аномальное количество осадков выше нормы отмечалось на станциях Охотского побережья, в 1989 г. – на востоке и континентальной части (в 2–3 раза выше нормы), а в 2002–2006 гг. – на северо-востоке территории (в 3–4 раза выше нормы). Аномально засушливый 1976 год, представленный на рис. 9, определялся также отрогом сибирского максимума на приземной карте и наличием гребня на карте АТ500. А поле аномально низкого давления в 1972 г. определяло избыток атмосферных осадков.

Таким образом, дефицит осадков определяется наличием над северо-востоком России аномально развитых гребней сибирского (ленско-колымского ядра) или арктического антициклонов, а избыток осадков обусловлен аномально развитой ложбиной алеутской депрессии или активной циклонической деятельностью на чукотской ветви арктического фронта.

2.3. Динамика осадков. Ранее нами было рассмотрено изменение осадков в январе и июле на станциях, являющихся представительными для четырех однородных по режиму температуры воздуха районов [11]. В указанной работе произведена оценка долговременных изменений ежемесячных осадков за 1966–2014 гг. с помощью рассчитанных коэффициентов наклона линейного тренда (мм/10 лет). Устойчивость выявленных тенденций определялась по коэффициенту детерминации (R^2), который также показывает вклад тренда в дисперсию осадков.

В многолетнем ходе годовых сумм осадков (рис. 10) отмечена тенденция к их уменьшению на большей части рассматриваемой территории, максимальное уменьшение осадков приходится на крайний восток (до 8 мм/10 лет). И только два небольших очага повышения осадков (до 1 мм/10 лет) отмечаются в долине р. Колымы и в Анадырской низменности. Надо отметить, что устойчивость тренда значима на двух из четырех рассматриваемых станций ($R^2 > 0.078$).

Рассмотрим динамику осадков за последние десятилетия в теплые сезоны (рис. 10). В марте – апреле в континентальной части и на юго-западе отмечено

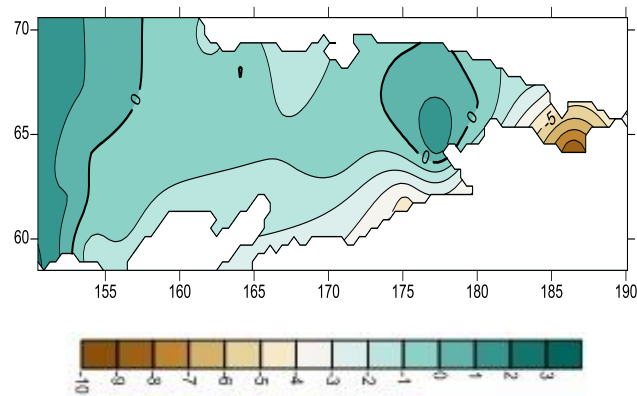


Рис. 10. Пространственное распределение коэффициентов наклона линейного тренда годовых сумм осадков (мм/10 лет) за 1966–2014 гг.

неустойчивое увеличение атмосферных осадков, а на севере и востоке – уменьшение, однако статистически значимо оно только в марте (от 2 до 4 мм/10 лет). В мае процесс изменения осадков нестабильный. Летом на севере и востоке, так же как и весной, наблюдается устойчивое, за исключением августа, снижение осадков (от 4 до 8 мм/10 лет). В континентальной части осадки увеличиваются (от 4 до 8 мм/10 лет), при этом устойчиво только в конце лета. На юге к концу лета также наблюдается статистически значимое увеличение осадков (от 2 до 14 мм/10 лет). На фоне увеличения осадков августа наблюдается уменьшение их межгодовых вариаций, что следует из анализа изменения СКО в течение исследуемого периода.

В начале и середине осени на большей части исследуемой территории выявлена незначительная тенденция увеличения осадков. В то время как в конце осени на севере и востоке вновь наблюдалось стабильное уменьшение осадков до 3–7 мм/10 лет (рис. 11). В начале зимы (декабрь) устойчивости изменения осадков не отмечено ни на одной из станций. Однако в январе атмосферные осадки стабильно (за исключением южных районов) уменьшаются на северо-востоке России. Коэффициенты наклона линейного тренда в этом месяце составляют в среднем от 2 до 5 мм/10 лет, достигая максимальных значений на беринговоморском побережье (10–15 мм/10 лет). Судя по характеру интегральной кривой, эпоха отрицательных аномалий в многолетнем распределении сумм осадков началась в середине 80-х годов двадцатого столетия. Межгодовая изменчивость осадков в январе (размах колебаний) увеличилась лишь на юго-западе территории и на побережье Анадырского залива. На остальной же территории отмечается уменьшение размаха колебаний, особенно на беринговоморском побережье. В конце зимы отрицательная тенденция в многолетнем ходе осадков сохраняется, однако она неустойчива, за исключением побережья Восточно-Сибирского моря и верхнего течения р. Колымы.

С целью выявления причин изменчивости атмосферных осадков была проведена корреляция данного метеопараметра с формами атмосферной циркуляции с формами W, E, C по классификации Г.Я. Вангенгейма и З, М₁, М₂ по классификации А.А. Гирса [12]. Анализируя годовые связи, можно отметить отрицательный

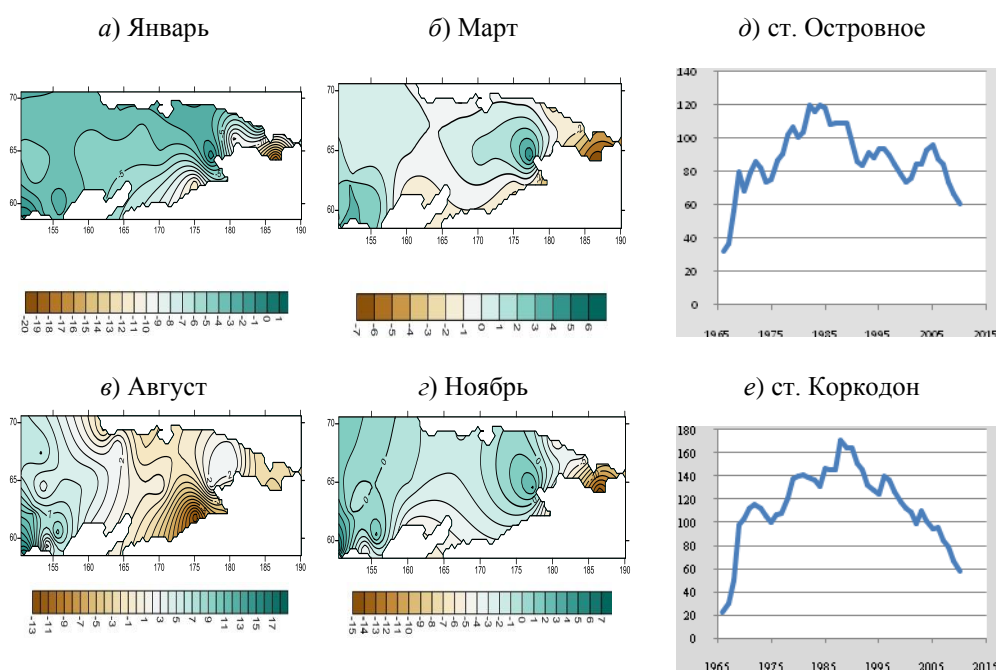


Рис. 11. *a–г* – пространственное распределение коэффициентов наклона линейного тренда атмосферных осадков (мм/10 лет) за 1966–2014 гг.; *д, е* – накопленные аномалии осадков января (горизонтальная ось – годы; вертикальная ось – накопленные аномалии, мм)

сигнал с формой W и формой З ($r = 0.4–0.6$), а положительный – с формой Е и M_1 ($r = 0.3–0.5$) в северном районе исследуемой территории. Зимой (январь) наблюдается такой же отклик аномалий осадков на атмосферные процессы, только на большей площади (северная и континентальная части). Весной (апрель) положительный сигнал с формой З прослеживается в центральном и южном районах северо-востока России.

Таким образом, хорошо развитый зональный перенос в средней тропосфере вызывает дефицит годовых (на севере) и зимних осадков (на севере и в центральной части территории) и увеличение весенних осадков (в континентальной и южной частях). Избыток годовых и зимних осадков обусловлен аномально развитым высотным гребнем над европейской частью России (форма Е) и гребнем над Алеутскими островами (форма M_1) [13].

2. Связь характеристик снежного покрова с атмосферными осадками

Твердые атмосферные осадки формируют снежный покров, который, в свою очередь, влияет на температуру и глубину промерзания почвогрунтов. Характеристики снежного покрова в настоящей работе представлены материалами наблюдений на 4 метеорологических станциях. Нарастание снежного покрова происходит до 32 см на севере и в бассейне р. Колымы (ст. Островное и Омолон) с сентября по март, а на востоке (ст. Марково) – с сентября по апрель (до 74.5 см). С апреля-мая высота снежного покрова уменьшается, исчезая в конце

Табл. 2

Коэффициенты парной корреляции между максимальной высотой снежного покрова и атмосферными осадками

Станция	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Магадан	0.44	0.73	0.61	0.18	0.40	0.54	0.87
Марково	0.74	0.81	0.49	0.63	0.41	0.52	0.35
Островное	0.22	0.47	0.52	0.48	0.43	0.34	0.40
Омолон	0.29	0.20	0.35	0.21	0.14	0.19	0.12

мая – начале июня. На ст. Магадане максимум (32 см) приходится на ноябрь – декабрь [14]. Величины парных коэффициентов корреляции между высотой снежного покрова и осадками меняются в пределах от 0.2 до 0.8 (табл. 2). Почти везде они статистически достоверны на 99%-ном уровне надежности.

Высота снежного покрова на севере и юге территории устойчиво увеличивается от 0.4 до 1.3 см/10 лет [15], однако в многолетнем ходе атмосферных осадков каких-либо изменений не выявлено. Это подтверждается невысокими коэффициентами корреляции между данными величинами. Так, на севере территории (ст. Островное) связь отсутствует в начале снежного периода, в декабре она наиболее тесная ($r = 0.52$), а к концу сезона вновь уменьшается. На юге, на ст. Магадан, корреляционные зависимости наиболее тесны в начале и конце периода снегозалегания, а в январе связь между атмосферными осадками и высотой снежного покрова отсутствует. Возможно, это связано с особым сезонным ходом максимальной высоты снежного покрова, когда сначала идет интенсивное нарастание от сентября к третьей декаде ноября, затем постепенное убывание высоты ко второй декаде февраля с последующим увеличением ко второй декаде апреля [14]. Убывание высоты снега обусловлено выносом теплого морского воздуха на побережье Охотского моря и выпадением смешанных осадков со второй декады декабря до конца января [16]. На востоке региона (ст. Марково) наблюдается неустойчивое снижение высоты снежного покрова. Вероятно, это связано с устойчивым снижением количества зимних осадков, в то время как осенние не меняются, а весенние лишь незначительно увеличиваются. Поэтому в этом районе корреляционные связи между атмосферными осадками и высотой снежного покрова значимы, но наиболее тесные они в первую половину периода снегозалегания ($r = 0.63–0.81$).

На западной станции Омолон в течение исследуемого периода высота снежного покрова практически не меняется, а динамика зимних атмосферных осадков устойчиво снижается. Эта несогласованность в долгопериодном изменении изучаемых показателей подтверждается невысокими коэффициентами корреляции ($r = 0.1–0.3$). Поскольку формирование снежного покрова является многофакторным процессом, отсутствие тесных связей между количеством осадков и высотой снежного покрова обусловлено другими причинами. Это и высокое местоположение пункта наблюдений – на Колымском нагорье, и влияние меняющегося температурного режима (температура воздуха устойчиво повышается, за исключением января, на 0.4–0.8 °C/10 лет) [17].

Другая характеристика снежного покрова, продолжительность периода снегозалегания, в среднем на изучаемой территории изменяется от 210 до 232 дней,

этот период более продолжительный на северо-западе территории, а менее – на востоке. Положительная динамика продолжительности снежного периода за 1950–2012 гг. наблюдается только в Омолоне. На остальных станциях этот показатель уменьшается, однако выявленные изменения нестабильны [15].

Выводы

На большей части исследуемой территории зимой и весной преобладают осадки класса «ниже нормы», летом – класса «норма», а осенью – «выше нормы».

По данным NCEP/NCAR-реанализа дефицит осадков холодного периода обусловлен аномально развитым гребнем сибирского антициклона, а избыток – ложбиной алеутской депрессии. Влияние аномально развитого гребня арктического антициклона вызывает дефицит, а влияние циклонов, формирующихся на чукотской ветви арктического атмосферного фронта, – избыток летних осадков.

Выявлена тенденция уменьшения годовых осадков на большей части территории с максимальным значением на крайнем востоке (до 8 мм/10 лет). Весомый вклад в это уменьшение вносят осадки теплых сезонов (весны-лета), за исключением практически повсеместного их увеличения в конце лета. Зимой атмосферные осадки стабильно (за исключением южных районов) уменьшаются на всем северо-востоке России, особенно с середины 80-х годов XX в.

Высота снежного покрова на севере и юге территории устойчиво увеличивается, на востоке наблюдается неустойчивое снижение, а на западе она практически не меняется. Зачастую характер изменения высоты снежного покрова не согласуется с изменением количества выпадающих твердых осадков, особенно на западе и юге территории. Это обусловлено многофакторностью формирования снежного покрова.

Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2012. – 1004 с. – URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/.
2. Кононова Н.К. Влияние циркуляции атмосферы на формирование снежного покрова на северо-востоке Сибири // Лед и снег. – 2012. – Т. 54, № 1. – С. 38–53. – doi: 10.17073/0368-0797-2015-2-121-126.
3. Климатический атлас СССР. Т. 1 / Под ред. Ф.Ф. Давитая. – М.: Гидрометеиздат, 1960. – 187 с.
4. Справочник по климату СССР. Ч. 2: Температура воздуха и почвы. Вып. 33: Чукотский национальный округ и Магаданская область. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 287 с.
5. Брызгин Н.Н., Дементьев А.А. Опасные метеорологические явления в Российской Арктике. – СПб.: Гидрометеиздат, 1996. – 154 с.
6. Зимич П.И. Атмосферные процессы и погода Восточной Арктики. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 238 с.
7. Чернышева Л.С., Платонова В.А. Расчет и интерпретация основных климатических показателей отдельных метеорологических величин. – Владивосток: Изд-во Дальневост. фед. ун-та, 2009. – 84 с.
8. Никитин А.Я., Сосунова И.А. Анализ и прогноз временных рядов в экологических наблюдениях и экспериментах. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. пед. ун-та, 2003. – 81 с.

9. Наставление по службе прогнозов. Разд. 2. Ч. VI. – М.: Моск. отд-ние Гидрометеозд-та, 1986. – 28 с.
10. *Переведенцев Ю.П.* Теория климата. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – 504 с.
11. *Сточкуте Ю.В., Василевская Л.Н.* Изменение температурно-влажностного режима на крайнем северо-востоке России. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. – С. 157–159 с.
12. *Гирс А.А., Кондратович К.В.* Методы долгосрочных прогнозов погоды. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 344 с.
13. *Багров Н.А., Кондратович К.В., Педь Д.А., Угрюмов А.И.* Долгосрочные метеорологические прогнозы / Науч. ред. К.В. Кондратович. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 248 с.
14. *Сточкуте Ю.В.* Статистические характеристики высоты снежного покрова на крайнем северо-востоке России // Материалы регион. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по естеств. наукам. – Владивосток: Дальневост. фед. ун-т, 2016. – С. 339–342. URL: [https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/8c5/2016\(1\).pdf](https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/8c5/2016(1).pdf), свободный.
15. *Сточкуте Ю.В., Василевская Л.Н.* Влияние снежного покрова на изменение температуры почвы на крайнем северо-востоке России // Современные проблемы регионального развития: Тезисы VI Междунар. науч. конф. / Под ред. Е.Я. Фрисмана. – Биробиджан: Ин-т комплексного анализа региональных проблем Дальневост. отд-ия РАН, 2016. – С. 163–166. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28137662&>.
16. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 2. Вып. 5: Дальний Восток / Под ред. Н.И. Лисогурского и др. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 177 с.
17. *Сточкуте Ю.В., Василевская Л.Н.* Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Геогр. вестн. – 2016. – № 2. – С. 85–97.

Поступила в редакцию
08.07.17

Василевская Любовь Николаевна, кандидат географических наук, доцент кафедры океанологии и гидрометеорологии

Дальневосточный федеральный университет
ул. Суханова, д. 8, г. Владивосток, 690950, Россия
E-mail: lubavass@mail.ru

Сточкуте Юлия Витауто, аспирант кафедры океанологии и гидрометеорологии

Дальневосточный федеральный университет
ул. Суханова, д. 8, г. Владивосток, 690950, Россия
E-mail: julias76@mail.ru

**Analysis of the Long-Term Variations in Precipitation and Snow Depth
in the Northeast of Russia during the Period of 1966–2014**

L.N. Vasilevskaya *, *Yu.V. Stochkute* **
Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690950 Russia
E-mail: **lubavass@mail.ru*, ***julias76@mail.ru*

Received July 8, 2017

Abstract

The purpose of this study is to analyze the interannual variability of atmospheric precipitation and snow depth in the northeast of Russia (Chukotka Autonomous Okrug, Magadan Region, Eastern Yakutia) for the period of 1966–2014. The following tasks are set in accordance with the above purpose: to investigate the atmospheric precipitation regime, as well as its rates and nature of changes in it; to reveal the relationship between the precipitation regime and snow depth.

The monthly amount of atmospheric precipitation registered at 26 meteorological stations during 1966–2014 and the snow depth measured daily at four stations (Ostrovnoe, Markovo, Magadan, and Omolon) during 1966–2012 are the source data (www.meteo.ru) for the research. All the initial series have been subjected to statistical processing. Linear trends have been constructed. Their significance has been estimated by the coefficient of determination (R^2) at the confidence probability level of 95%. Correlation analysis of the atmospheric precipitation and snow depth has been carried out.

All conclusions are based on the statistical results of the investigation. A tendency of decreasing annual precipitation over a larger area with the highest value in the east (up to 8 mm /10 years) has been revealed. A significant contribution to this reduction is made by the precipitation of warm seasons (spring–summer) with the exception of their almost widespread increase at the end of summer. In the winter time, the amount of precipitation is stable in the entire northeast of Russia (except the southern regions), especially since the middle of 1980s.

The snow depth in the north and south of the territory increases steadily. Unstable declines have been found in the east. In the west, the values of snow depth remain almost unchanged. The nature of variations in the snow depth does not agree with that of changes in the amount of solid precipitation, especially in the west and the south of the territory. This is due to the multifactorial formation of the snow cover.

Keywords: atmospheric precipitation, snow cover, snow depth, statistical analysis, trend assessment, correlation analysis

Figure Captions

- Fig. 1. Schematic map for the location of weather stations (weather stations, where the observations of the snow cover were performed are given in frames).
- Fig. 2. Spatial distribution of the long-term average seasonal and annual precipitation amounts (1966–2014).
- Fig. 3. Annual variations in the precipitation amount in different areas.
- Fig. 4. Recurrence of three classes of seasonal and annual precipitation at the studied stations. Horizontal axis – stations numbered according to Fig. 1.
- Fig. 5. Spatial-temporal distribution of the anomalies (% of the normal value) in precipitation amount (vertical axis – years, horizontal axis – stations numbered according to Fig. 1).
- Fig. 6. Distribution of the atmospheric pressure anomalies at the sea level and the H500 geopotential on January of 1998 and 1991. X-axis – the longitude from 145°E to 170° W, Y-axis – the latitude from 45° N to 75° N.

- Fig. 7. Distribution of the atmospheric pressure anomalies at the sea level on April of 1984 and 1988. X-axis – the longitude from 145°E to 170° W, Y-axis – the latitude from 45° N to 75° N.
- Fig. 8. Distribution of the atmospheric pressure anomalies at the sea level on July 1989 and 1991. X-axis – the longitude from 145°E to 170° W, Y-axis – the latitude from 45° N to 75° N.
- Fig. 9. Distribution of the atmospheric pressure anomalies at the sea level on October of 1972 and 1976. X-axis – the longitude from 145°E to 170° W, Y-axis – the latitude from 45° N to 75° N.
- Fig. 10. Spatial distribution of the slope coefficients of annual precipitation linear trend (mm/10 years) in 1966–2014.
- Fig. 11. *a–d* – spatial distribution of the slope coefficients of annual precipitation linear trend (mm/10 years) during 1966–2014; *e, f* – accumulated anomalies of precipitation on January (horizontal axis – years; vertical axis – accumulated anomalies, mm).

References

1. The Second Assessment Report about Climate Change and Its Impact on the Territory of the Russian Federation. 2012. 1004 p. Available at: URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/. (In Russian)
2. Kononova N.K. The influence of atmospheric circulation on the formation of snow cover in north-eastern Siberia. *Led Sneg*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 38–53. doi: 10.17073/0368-0797-2015-2-121-126. (In Russian)
3. Climatic Atlas of the USSR. Vol. 1. Davitaya F.F. (Ed.). Moscow, Gidrometeoizdat, 1960. 187 p. (In Russian)
4. Handbook of Climate of the USSR. Part 2: Air and Soil Temperature. Issue 33: Chukotka National Okrug and Magadan Region. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966. 287 p. (In Russian)
5. Bryazgin N.N., Dement'ev A.A. Hazardous Meteorological Phenomena in Russian Arctic Region. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1996. 154 p. (In Russian)
6. Zimich P.I. Atmospheric Processes and Weather in East Arctic. Vladivostok, Dal'nauka, 1998. 238 p. (In Russian)
7. Chernysheva L.S., Platonova V.A. Calculation and Interpretation of the Basic Climatic Parameters of Individual Meteorological Quantities. Vladivostok, Izd. Dal'nevost. Fed. Univ., 2009. 84 p. (In Russian)
8. Nikitin A.Y., Sosunova I.A. Analysis and Prediction of Time Series in Environmental Observations and Experiments. Irkutsk, Izd. Irkutsk. Gos. Pedagog. Inst., 2003. 81p. (In Russian)
9. Manual for Forecasts. Section 2. Part VI. Moscow, Otd. Gidrometeoizdata, 1986. 28 p. (In Russian)
10. Perevedentsev Yu.P. Climate Theory. Kazan, Kazan. Gos. Univ., 2009. 504 p. (In Russian)
11. Stochkute Y.V., Vasilevskaya L.N. Changes in the Temperature-Humidity Regime in the Extreme Northeast of Russia. Irkutsk, Izd. Inst. Geogr. im. V. B. Sochavy Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2015, pp. 157–159. (In Russian)
12. Girs A.A., Kondratovich K.V. Methods of Long-Term Weather Forecasts. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1978. 344 p. (In Russian)
13. Bagrov N.A., Kondratovich K.V., Ped' D.A., Ugryumov A.I. Long-Term Meteorological Forecasts. Kondratovich K.V. (Ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985. 248 p. (In Russian)
14. Stochkute Yu.V. Statistical characteristics of the snow depth in the extreme northeast of Russia. *Materialy region. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchennykh po estestv. naukam* [Proc. Reg. Sci.-Pract. Conf. on Natural Sciences for Students, Postgraduate Students, and Young Scientists]. Vladivostok, Izd. Dal'nevost. Fed. Univ., 2016, pp. 339–342. Available at: [https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/8c5/2016\(1\).pdf](https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/8c5/2016(1).pdf). (In Russian)
15. Stochkute Yu.V., Vasilevskaya L.N. The Effect of Snow Depth on Soil Temperature Change in the Extreme Northeast of Russia. *Sovremennye problemy regional'nogo razvitiya: Tezisy VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Modern Problems of Regional Development: Proc. VI Int. Sci. Conf.]. Frisman E.Ya. (Ed.). Birobidzhan, Inst. Kompleksnogo Anal. Reg. Probl. Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2016, pp. 163–166. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28137662&>. (In Russian)

16. Handbook on Short-Term Weather Forecasting. Part 2, Issue 5: Far East. Lisogurskii N.I. et al. (Eds.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988. 177 p. (In Russian)
17. Stochkute Yu.V., Vasilevskaya L.N. Long-Term Changes in Air and Soil Temperature in the Extreme Northeast of Russia. *Geogr. Vestn.*, 2016, no. 2, pp. 85–97. (In Russian)

Для цитирования: Василевская Л.Н., Сточкоте Ю.В. Анализ многолетней изменчивости атмосферных осадков и высоты снежного покрова на северо-востоке России (1966–2014 гг.) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 4. – С. 681–699.

For citation: Vasilevskaya L.N., Stochkute Yu.V. Analysis of the long-term variations in precipitation and snow depth in the northeast of Russia during the period of 1966–2014. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2017, vol. 159, no. 4, pp. 681–699. (In Russian)