

К.С. Кириллина, В.А. Лобанов

**ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АТМОСФЕРНЫХ
ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)**

K.S. Kirillina, V.A. Lobanov

**ASSESSMENT OF MODERN VARIABILITY OF ATMOSPHERIC
PRECIPITATION IN THE TERRITORY OF REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)**

Проведен анализ особенностей изменчивости атмосферных осадков на территории Республики Саха (Якутия) по сезонам года за период 1966–2009 гг. Анализ и сопутствующая оценка проводились на основе статистического моделирования и определения вида модели временного ряда (на основе модели линейного тренда и ступенчатой модели).

Ключевые слова: современное изменение климата, статистическое моделирование, внутригодовое изменение количества атмосферных осадков.

We made the analysis of features of variability of an atmospheric precipitation in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) on seasons of year during 1966–2009. The analysis and corresponding assessment conducted on the basis of statistical modeling and definition of a type of model of a temporary row (the model of a linear trend and step model).

Key words: modern climate change, statistic modeling, intra annual changing of atmospheric precipitation.

Общеизвестно, что вторым по важности индикатором современного потепления климата после повышения температуры воздуха является увеличение количества атмосферных осадков, но осадки были и остаются одним из самых изменчивых во времени и пространстве элементов климата, а межгодовые колебания годовых их сумм гораздо более значительны, нежели температуры воздуха. При этом атмосферные осадки исключительно важны для различных аспектов жизнедеятельности человека (сельское хозяйство, энергетика и транспорт, опасные гидрологические явления, связанные с наводнениями и засухами, и др.) и собственно для самой климатической системы (облачность, потоки скрытого тепла, приток пресной воды в океан, аккумуляция (разрушение) ледовых щитов и горных ледников и т.д.). Однако климатология осадков изучена значительно хуже, чем климатология температуры и особенно плохо изучен режим осадков над океаном [8]. Следовательно, человечеству пока не совсем понятны тенденции изменения режима осадков, вызванного потеплением климата как в глобальном, так и в региональном масштабах.

Исследования климатических тенденций приземной температуры воздуха, осадков и температуры поверхности Мирового океана показали статистически значимое глобальное потепление и увеличение сумм атмосферных осадков [13]. По оценкам на основе современных климатических моделей такая тенденция общего роста

осадков будет иметь место и в XXI в., но менять свою интенсивность в зависимости от региона [17].

Климат России, являясь частью глобальной климатической системы, в последнее время испытывает очевидные изменения. Большая часть территории России находится в высоких широтах Северного полушария, где согласно данным наблюдений в настоящее время происходят наиболее значительные изменения климата. Более того, именно в указанных высоких широтах все известные климатические модели прогнозируют усиление потепления, вызванного антропогенным ростом парниковых газов в атмосфере [12]. В связи с этим основной целью данной статьи является оценка современной изменчивости атмосферных осадков на территории Республики Саха (Якутия), крупнейшего региона нашей страны со специфическими природно-климатическими условиями, расположенного в высоких широтах, где должно проявить себя современное глобальное потепление. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты расчетов будущих изменений атмосферных осадков на территории России по ансамблю моделей проекта CMIP5, выполненных в рамках подготовки 5-го оценочного доклада МГЭИК [17, 18], где оценки даны по трем новым сценариям RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5, связанным со стабилизацией общего антропогенного воздействия в 2100 г. на уровнях, соответственно, 2,6, 4,5, и 8,5 Вт/м² вместо используемых ранее концентраций CO₂ в ppm.

Из рис. 1 отчетливо видно, что повышения количества атмосферных осадков в ближайшие 15–16 лет должны затронуть всю территорию нашей страны, но оцениваемый рост годовых осадков составляет всего 5–6 %, что находится в пределах погрешности их определения. Вместе с тем наибольший внутригодовой прирост атмосферных осадков в исследуемом регионе Восточной Сибири предполагается в зимний сезон, наименьший — летом. Поэтому задачей настоящей статьи является оценка современных тенденций изменения осадков и их сопоставления со сценарными оценками на ближайшую перспективу.

Исходными данными для статистических оценок и моделирования являются ряды наблюдений за атмосферными осадками на 96 метеорологических станциях сети наблюдений в исследуемом регионе, которые имеют наиболее полный, непрерывный период наблюдений и функционируют до настоящего времени. Источниками информации выступили фондовые данные ФГБУ «Якутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Климатические изменения месячных сумм атмосферных осадков в данной статье оценивались, главным образом, для периода с 1966 по 2013 г. Выбор начала периода исследования обусловлен тем, что с 1966 г. Гидрометеослужба проводит наблюдения по единой методике (восемь сроков в сутки, поправки к измеренным осадкам) и одинаковыми приборами. Смена приборов (дождемера на осадкомер Третьякова с лепестковой защитой) происходила в 1950-е гг. и поэтому можно считать, что именно твердые осадки до начала 1960-х гг. являются заниженными за счет ветрового выдувания.

Карта распределения метеостанций по территории Республики Саха (Якутия), представлена на рис. 2, согласно которой можно сделать вывод, что станции распределены достаточно равномерно и покрывают всю территорию региона исследования.

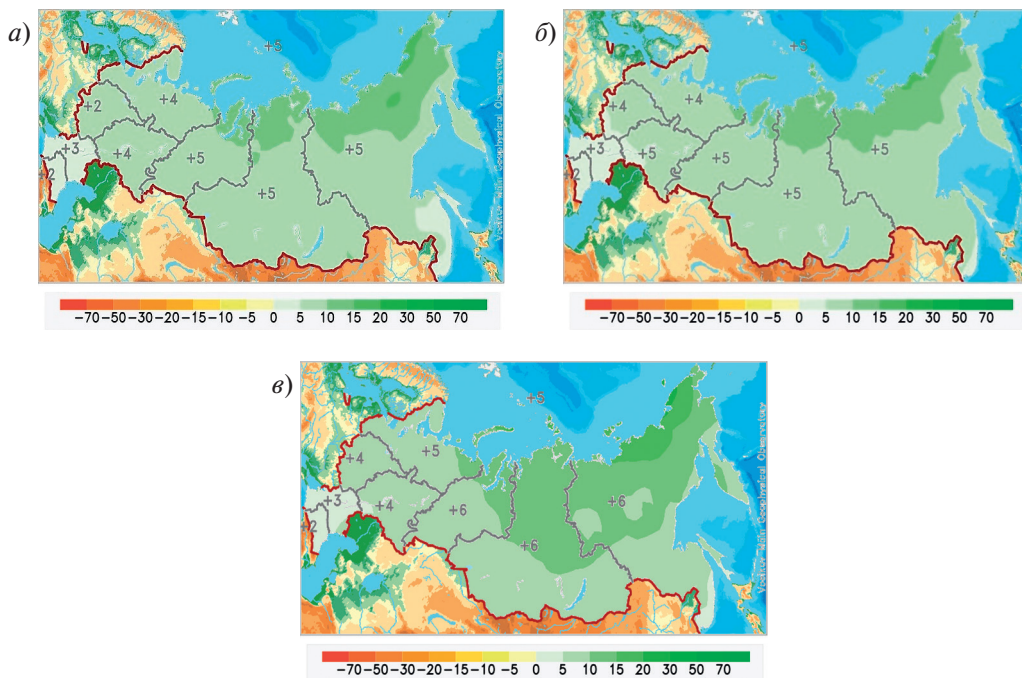


Рис. 1. Изменения среднегодовых атмосферных осадков за 2011–2031 гг. для сценариев RCP2.6 (а), RCP4.5 (б) и RCP8.5 (в) по отношению к периоду 1981–2000 гг.



Рис. 2. Распределение пунктов наблюдений за атмосферными осадками по территории Республики Саха (Якутия)

Распределение метеостанций по продолжительности рядов наблюдений за атмосферными осадками на территории Якутии представлено в табл. 1, из которой следует, что подавляющее число метеостанций имеет период наблюдений 50 лет и более, а 7 из них — продолжительность наблюдений 100 лет и более, что дает возможность использовать их в качестве аналогов для приведения коротких рядов к непрерывному, многолетнему и одинаковому периоду, и восполнению пропусков наблюдений.

Таблица 1

**Распределение метеостанций Республики Саха (Якутия)
по продолжительности проводимых метеонаблюдений за атмосферными осадками**

Количество лет наблюдений	Количество метеостанций
10	1
20	1
30	1
40	4
50	6
60	27
70	34
80	14
90	1
100	2
110	3
120	2

Оказалось, что средний период наблюдений за атмосферными осадками в Якутии составляет 72 года. В свою очередь наибольший период наблюдений составил 126 лет имеет место на старейшей метеостанции республики — г. Якутск. Также наибольшая продолжительность наблюдений за атмосферными осадками имеется на метеостанциях: Верхоянск (122 года), Среднеколымск (113 лет), Вилюйск (116 лет), Олекминск (119 лет), Усть-Мая (109 лет) и Кюсюр (100 лет). В результате проведенной работы была сформирована база данных климатических показателей атмосферных осадков, включающая практически все имеющиеся в наличии наблюдения за количеством среднемесячных атмосферных осадков на территории Республики Саха (Якутия).

Следующим шагом исследования явилась оценка качества и однородности исходной информации и формирование базы проверенных и однородных данных многолетних рядов атмосферных осадков с отсутствием пропусков наблюдений. Для оценки однородности данных были использованы статистические критерии Диксона и Смирнова–Грabbса [4, 15], позволяющие выявлять резко отклоняющиеся от общего эмпирического распределения экстремумы, которые могут быть обусловлены как погрешностями самих наблюдений или расчета эмпирической повторяемости редких событий, так и другим генезисом формирующих факторов. В результате проведенного статистического анализа однородности было установлено, что число неоднородных

экстремумов для рядов наблюдений за среднемесячными атмосферными осадками очень мало и составляет всего 0,3 % от общего числа эмпирических распределений.

Так как в рядах в отдельные годы имеются пропуски наблюдений была проведена процедура восстановления пропусков наблюдений по методике, представленной и реализованной, например, в работах [14, 9, 10, 6]. Подобная процедура является необходимой для дальнейшего статистического моделирования временных рядов, чтобы результаты были достаточно надежны и их можно было обобщать по территории. Исходя из этого нами было выполнено восстановление пропусков и удлинение коротких рядов имеющихся данных за атмосферными осадками в исследуемом регионе с помощью Программного комплекса «Гидрорасчеты» (сертификат Госстандарта Российской Федерации № 0812948, РОСС RU.СП04.Н00118 и Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ № 2010615886) [Лобанов В.А., Задорожный С.П. и др., 2011]. В результате была получена база данных многолетних рядов атмосферных осадков по Республике Саха (Якутия) практически одинаковой продолжительности с включением последних лет наблюдений до 2013 г. для проведения последующего статистического моделирования.

Проведенное нами моделирование временных рядов было основано на расчете параметров трех основных моделей: модели стационарной выборки и двух альтернативных нестационарных моделей: линейного тренда и ступенчатого изменения средних значений [5, 1, 11]. В качестве основного параметра по которому осуществлялось сравнение моделей было выбрано стандартное отклонение остатков, широко применяемое в регрессионном анализе и статистическом оценивании [2, 3].

По приведенной методике были рассчитаны отличия нестационарных моделей от стационарной модели в % и статистики критерия Фишера с последующей оценкой их статистической значимости для всех рядов среднемесячных атмосферных осадков на 96 метеостанциях Республики Саха (Якутия) за период наблюдений 1966–2013 гг.

Рассчитанные показатели оценки эффективности нестационарных моделей по отношению к модели стационарной выборки приведены в табл. 2 только для случаев, когда отличие от стационарной модели составляло 10 % и более. В табл. 2 также приводятся рассчитанные статистики критериев Фишера ($F_{ст}$) и Стьюдента ($St_{ст}$) для двух частей временного ряда по дате ступенчатого изменения, годы начала ($T_{нач}$) и окончания наблюдений ($T_{кон}$), год ступенчатого изменения ($T_{ступ}$), период наблюдений в годах (N) и коэффициент корреляции уравнения линейного тренда ($R_{тр}$). Жирным шрифтом в табл. 2 отмечены эффективные Δ и статистически значимые F и $R_{тр}$.

Таблица 2

**Эффективные нестационарные модели и их характеристики
(среднемесячные атмосферные осадки, Республика Саха (Якутия))**

Код ВМО	$\Delta_{\text{тр}}, \%$	$\Delta_{\text{ступ}}, \%$	$F_{\text{тр}}$	$F_{\text{ступ}}$	$F_{\text{ст}}$	$St_{\text{ст}}$	$T_{\text{ступ}}$	$T_{\text{нач}}$	$T_{\text{кон}}$	N	$R_{\text{тр}}$
январь											
21608	5,3	18,7	1,11	1,51	3,71	5,41	2003	1966	2013	48	0,32
24194	20,7	25	1,59	1,78	1,5	-3,56	1982	1966	2013	48	-0,61
24266	7,9	11,3	1,18	1,27	1,23	-2,44	1980	1966	2013	48	-0,39
24343	17,5	19,4	1,47	1,54	2,45	4,58	2001	1966	2013	48	0,56
24382	16,9	15,7	1,45	1,41	1,29	-3,2	1986	1966	2013	48	-0,56
24585	10,4	11,5	1,24	1,28	29,9	2,8	1990	1966	2013	48	0,44
24588	10,3	11,1	1,24	1,27	1,19	-2,58	1980	1966	2013	48	-0,44
24679	14,2	22	1,36	1,65	1,03	-3,39	1982	1966	2013	47	-0,51
24688	14,1	13,7	1,36	1,34	1,52	-2,88	1981	1966	2013	48	-0,51
25017	24,1	36,6	1,74	2,49	5,13	-3,59	1990	1970	2013	43	-0,65
25121	26,5	23,1	1,85	1,69	1,39	-3,26	1980	1966	2013	48	-0,68
25123	10,2	10,9	1,24	1,26	1	-2,46	1983	1966	2013	48	-0,44
25206	19,8	20,8	1,55	1,6	1,87	-3,38	1989	1966	2013	48	-0,6
25400	13,3	17,8	1,33	1,48	1,27	-2,99	1983	1966	2013	48	-0,5
февраль											
21608	10	11,8	1,23	1,29	15,7	2,3	1999	1983	2013	31	0,43
21813	5,2	13,9	1,11	1,35	1,36	-3,31	1998	1966	2013	48	-0,32
24125	4,7	13,1	1,1	1,32	6,98	2,44	1978	1966	2013	48	0,3
24194	10,5	9,7	1,25	1,23	1,06	-2,71	1995	1966	2013	48	-0,45
24219	6,8	13,3	1,15	1,33	2,55	3,47	1995	1966	2013	48	0,36
24261	7	11,1	1,16	1,26	1,05	-2,28	1979	1966	2013	48	-0,37
24322	4,3	10,9	1,09	1,26	3,97	2,46	1986	1966	2013	48	0,29
24641	6,3	10	1,14	1,23	9,63	3,11	1978	1966	2013	48	0,35
24679	14,8	22,7	1,38	1,68	1,78	-4,1	1998	1966	2013	48	-0,52
24688	7,4	12,2	1,17	1,3	1,27	-2,96	1995	1966	2013	48	-0,38
24725	6,9	10,3	1,15	1,24	1,81	3,12	1997	1966	2013	48	0,36
24826	10,9	13,8	1,26	1,35	4,04	3,22	1992	1966	2013	48	0,45
24923	9,9	11,5	1,23	1,28	3,31	2,91	1989	1966	2013	48	0,43
25017	9,3	13,8	1,22	1,35	1,21	-2,72	1995	1975	2013	39	-0,42
25121	19,1	18,8	1,53	1,52	1,65	-3,27	1983	1966	2013	48	-0,59
30054	11,7	14,1	1,28	1,36	3,02	3,08	1989	1966	2013	48	0,47
30173	7,8	10,1	1,18	1,24	3,15	3,41	1999	1966	2013	48	0,39

Продолжение таблицы 2

Код ВМО	$\Delta_{тр}, \%$	$\Delta_{ступ}, \%$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ}$	$T_{нач}$	$T_{кон}$	N	$R_{тр}$
март											
21813	4	11,8	1,08	1,28	1,12	-2,93	1994	1966	2013	48	-0,28
24826	4,5	12,2	1,1	1,3	3,34	2,77	1985	1966	2013	48	0,3
24923	3,5	12,2	1,07	1,3	3,46	2,82	1989	1966	2013	48	0,26
апрель											
21813	6,2	13,5	1,14	1,34	1,36	-2,9	1992	1966	2013	48	-0,35
24111	4,9	12,4	1,11	1,3	2,03	-2,41	1976	1966	2013	48	-0,31
24261	7,8	18,5	1,18	1,5	2,95	-2,43	1976	1966	2013	48	-0,39
май											
24738	8,3	12,2	1,19	1,3	6,51	2,99	1991	1966	2013	48	0,4
24739	8,8	12,1	1,2	1,3	9,62	3,13	1992	1966	2013	48	0,41
24933	12	16,2	1,29	1,42	5,33	3,95	1996	1966	2013	48	0,47
30173	9,6	10	1,22	1,23	3,65	3,17	1996	1966	2013	48	0,43
июнь											
21802	9,9	14	1,23	1,35	1,51	-2,54	1979	1966	2013	47	-0,43
21813	12,9	16	1,32	1,42	1,64	-2,33	1976	1966	2013	45	-0,49
24143	8,5	12,3	1,19	1,3	4,77	2,83	1986	1966	2013	48	0,4
24194	9,4	12,5	1,22	1,3	1,5	-2,36	1979	1966	2013	48	-0,42
24538	12,9	21,9	1,32	1,64	3	5,11	2002	1966	2013	48	0,49
24944	6,2	11,6	1,14	1,28	1,57	-2,6	1985	1966	2013	48	-0,35
25206	7,2	15,9	1,16	1,41	2,02	4,15	2003	1966	2013	48	0,37
25400	7,5	18	1,17	1,49	2,45	4,46	2002	1966	2013	48	0,38
июль											
21802	11,1	14,7	1,27	1,37	1,51	-2,92	1984	1966	2013	48	-0,46
24656	3	13,1	1,06	1,32	1,75	3,77	2003	1966	2013	48	0,24
24739	3,6	11,5	1,07	1,28	2,77	3,36	1997	1966	2013	48	0,26
24856	1,8	10	1,04	1,24	2,1	3,48	2003	1966	2013	48	0,19
август											
21921	5,7	13,2	1,12	1,33	3,75	2,52	1983	1966	2013	48	0,33
24219	4,1	10,3	1,09	1,24	2,85	3,18	1996	1966	2013	48	0,28
24758	3,1	10,6	1,07	1,25	2,9	3,77	2003	1966	2013	48	0,25
25123	4,5	14,5	1,1	1,37	5,58	2,85	1988	1966	2013	48	0,3
31004	4,1	10,3	1,09	1,24	1,46	3,22	2003	1966	2013	48	0,29
31016	3,4	11,1	1,07	1,27	1,74	3,59	2003	1966	2013	48	0,26

Код ВМО	$\Delta_{тр}, \%$	$\Delta_{ступ}, \%$	$F_{тр}$	$F_{ступ}$	$F_{ст}$	$St_{ст}$	$T_{ступ}$	$T_{нач}$	$T_{кон}$	N	$R_{тр}$
сентябрь											
24111	5,1	11,6	1,11	1,28	2,24	3,73	2002	1966	2013	48	0,32
24449	2,1	10,6	1,04	1,25	4,28	3,33	1996	1966	2013	47	0,21
24661	6,5	10	1,14	1,23	1,95	2,84	1993	1966	2013	48	0,35
24668	6,9	13,5	1,15	1,34	3,48	3,62	1996	1966	2013	48	0,36
24679	3,7	10,6	1,08	1,25	2,18	3,21	1998	1966	2013	48	0,27
24771	3,3	10,8	1,07	1,26	1,77	3,09	1995	1966	2013	48	0,25
24975	3,5	10,4	1,07	1,25	1,75	3,11	1996	1966	2013	48	0,26
30054	4,2	11,3	1,09	1,27	1,97	3,54	2001	1966	2013	48	0,29
октябрь											
24111	7,9	11,5	1,18	1,28	1,3	-3,18	1996	1966	2013	48	-0,39
24143	0,3	10,1	1,01	1,24	3,61	-1,64	1976	1966	2013	48	-0,07
24343	8,3	10,2	1,19	1,24	9,42	2,67	1990	1966	2013	48	0,4
30393	9,1	15,1	1,21	1,39	7,8	4	1996	1966	2013	48	0,42
31102	7,1	12,1	1,16	1,29	2,47	3,75	2001	1966	2013	48	0,37
ноябрь											
21608	7,1	15,4	1,16	1,4	1,87	3,9	1999	1966	2013	48	0,37
31016	6,3	13,7	1,14	1,34	4,59	4,35	2001	1966	2013	48	0,35
декабрь											
21535	6,6	10,7	1,15	1,25	5,55	3,07	1993	1966	2013	47	0,36
21908	9,7	10,5	1,23	1,25	1,62	-3	1997	1966	2013	48	-0,43
24111	7,5	11,2	1,17	1,27	1,56	-2,61	1986	1966	2013	45	-0,38
24194	7,4	16,6	1,17	1,44	1,19	-2,54	1976	1966	2013	48	-0,38
24266	8,1	11	1,18	1,26	1,23	-2,71	1989	1966	2013	48	-0,39
24639	12,1	13	1,3	1,32	1,36	-3,42	2000	1966	2013	48	-0,48
24661	5,6	10,6	1,12	1,25	1,04	-2,77	1994	1966	2013	48	-0,33
24753	7	11,1	1,16	1,26	1,41	-2,92	1994	1966	2013	48	-0,37
24768	7,2	11	1,16	1,26	1,52	-2,89	1994	1966	2013	48	-0,37
24856	14,2	17,4	1,36	1,47	1,71	-3,29	1991	1966	2013	48	-0,51
24959	8	12,6	1,18	1,31	1,25	-3,14	1994	1966	2013	48	-0,39
24962	9,2	11,7	1,21	1,28	1,63	-2,92	1994	1966	2013	48	-0,42

В более обобщенном виде результаты моделирования представлены в табл. 3, где $\Delta_{ступ}$ и $\Delta_{тр}$ — среднее отклонение от стационарной модели (в %) по всем рядам, %н — процент эффективных нестационарных моделей от общего числа рядов данного месяца для которых $\Delta > 10\%$, n_F — число рядов со статистически значимыми нестационарными моделями по критерию Фишера.

Таблица 3

Средние территориальные значения показателей эффективности нестационарных моделей среднемесячных атмосферных осадков за период с 1966 по 2013 г. по Республике Саха (Якутия)

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Модель ступенчатых изменений												
$\Delta_{\text{ступ}}$	5,8	6,1	3,9	4,3	4,0	4,2	3,6	4,7	5,1	4,1	3,8	6,1
%н	14,6	16,7	3,1	3,1	4,2	8,3	4,2	6,3	8,3	5,2	2,1	12,5
n_F	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Модель линейного тренда												
Δ_r	3,2	3,2	1,1	1,3	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	1,6	1,3	2,7
%н	12,5	6,3	-	-	1,0	2,1	1,0	-	-	-	-	2,1
n_F	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Как следует из табл. 3, средний территориальный процент отклонений от стационарной модели больше для модели ступенчатых изменений (4,6 %), чем для модели линейного тренда (1,9 %), также, как и процентное число нестационарных моделей ступенчатых изменений (7,4 %) больше, чем модели линейного тренда (2,1 %) почти в 4 раза. Поэтому можно сделать вывод, что модель ступенчатых изменений в целом эффективнее, нежели чем модель линейного тренда. В то же время по абсолютной величине, как средний процент, так и число нестационарных моделей невелики, о чем свидетельствует малое количество статистически значимых нестационарных моделей, которое изменяется внутри года от 1 до 14–16 случаев из 96.

Динамика нестационарности внутри года имеет максимум в декабре–феврале, когда нестационарными являются более 10 % всех рядов наблюдений, причем по знаку коэффициента корреляции линейного тренда (табл. 2) преобладает уменьшение осадков, хотя есть и их рост. В другие месяцы года процент нестационарных рядов составляет от 2,1 % в ноябре до 8,3 % в июне и сентябре, когда формируется как-бы второй максимум нестационарности внутри года — но уже в течение теплого сезона года. Также следует, что ступенчатый рост/ступенчатое снижение осадков наблюдались чаще всего в 1980–1990 гг. (табл. 2).

Чтобы выяснить в какой части территории Республики Саха (Якутия) имеют место нестационарные модели были построены пространственные распределения $\Delta_{\text{ступ}}$ для месяцев, где эти отличия от стационарности являются наиболее существенными (декабрь, январь, февраль, сентябрь). Эти пространственные распределения показаны на рис. 3, где оттенками черного выделена территория с $\Delta_{\text{ступ}} > 10\%$, а оттенками серого и белым — территория со стационарными моделями.

Как следует из рис. 3, нестационарность наиболее сильно проявляет себя в зимние месяцы, а именно с декабря по февраль. Если в декабре нестационарность представлена в виде отдельных очагов в центре, северо-востоке республики и небольшого на западе, то в январе она занимает северо-восток и чуть меньшую площадь на северо-западе. К февралю нестационарность смещается к западу республики. К концу зимы (март)

нестационарность исчезает и территория Якутии становится практически полностью стационарной, за исключением двух маленьких очагов на севере и западе республики. В начале переходного сезона (апрель) происходит усиление нестационарности в северных частях республики. Весной (май) снова происходит ослабление нестационарности, территория республики становится почти полностью стационарна, за исключением небольшого очага нестационарности на западе. В начале летнего сезона (июнь) происходит второй всплеск нестационарности, но более слабый по сравнению с зимним, который имеет очаговый характер и проявляет себя практически на всей территории республики за исключением ее северной оконечности и центра. В оставшиеся летние месяцы (июль и август) территория республики снова становится стационарна за исключением точечного распространения нестационарности уже в разных частях республики. Осенью (сентябрь) происходит третий всплеск нестационарности, который проявляет себя наиболее сильно в восточной и центральной частях и несколько меньше на западе Якутии. В начале зимнего периода (октябрь, ноябрь) нестационарность снова ослабевает и проявляет себя в виде небольших очагов, постепенно смещаясь с западной части на север и центральную части республики, чтобы вновь обрести силу в декабре.

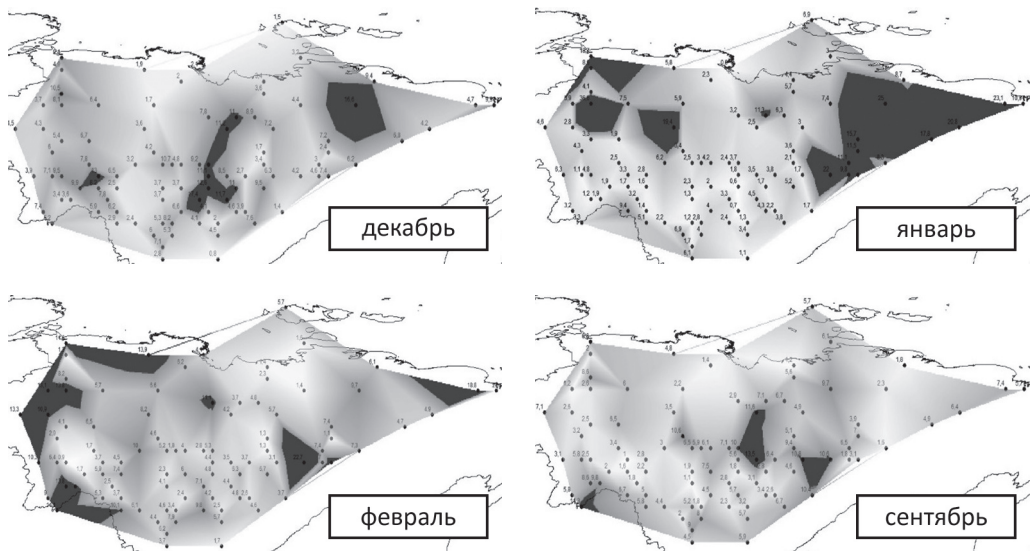


Рис. 3. Пространственные модели отклонений от нестационарности $\Delta_{\text{стн}}$ в % для среднемесячных атмосферных осадков за период с 1966 по 2013 г. по территории Республики Саха (Якутия)

Основной вывод заключается в том, что нестационарность в рядах атмосферных осадков в исследуемом регионе проявляется на разных станциях в разные месяцы: в половине случаев количество осадков увеличивается, а в другой половине — уменьшаются без выраженной тенденции в ту или иную сторону, исключение составляет лишь некоторая тенденция к снижению количества осадков в зимние месяцы (с декабря по февраль) на севере Якутии.

Предлагаемая методика оценки эффективности вида модели временного ряда является статистически обоснованной, но в тоже время имеет место и известная стратегия оценки стационарности, основанная на сравнении средних значений и дисперсий двух частей временного ряда по статистическим критериям Стьюдента и Фишера соответственно [7]. Поэтому было бы интересно в рамках данного исследования сопоставить процент полученных нестационарных моделей по обеим методике. При этом, разбиение временного ряда на две части осуществлялось по формуле (1), т.е. заведомо задавались самые благоприятные условия для отличия средних значений:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (1)$$

где σ_y — стандартное отклонение исходного ряда (модель стационарного среднего); σ_{ε} — стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда; R — коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

Все полученные результаты оценки стационарности по статистическим критериям Фишера и Стьюдента, а также статистической значимости коэффициентов корреляции линейного тренда приведены в табл. 4, в которой n_F — число рядов со статистически значимой нестационарностью дисперсий двух частей временного ряда по критерию Фишера, n_{St} — число рядов со статистически значимой нестационарностью средних значений двух частей временного ряда по критерию Стьюдента, n_R — число рядов со статистически значимыми коэффициентами корреляции линейного тренда и n_n — число рядов с эффективной нестационарной моделью ступенчатых изменений при отличии от стационарной модели более, чем на 10 %.

Таблица 4

Число нестационарных рядов наблюдений за среднемесячными атмосферными осадками за период с 1966 по 2013 г. на метеостанциях Республики Саха (Якутия)

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
n_F	23	39	24	18	31	19	12	17	24	24	37	6
n_{St}	31	46	22	27	28	21	28	41	53	24	27	48
n_R	18	27	5	10	12	13	13	10	9	13	6	23
$n_n (>10\%)$	14	16	3	3	4	8	4	6	8	5	2	12

По результатам табл. 4 можно сделать вывод, что из трех методов оценки стационарности средних значений (критерий Стьюдента, линейный тренд и модель ступенчатых изменений) наибольшее число нестационарных рядов выявлено по критерию Стьюдента, а наименьшее — по эффективной модели ступенчатых изменений. В данном случае завышенный процент нестационарных средних по критерию Стьюдента связан с тем, что дата разбиения на подвыборки задана по наибольшему возможному расхождению средних внутри выборки, что является искусственной процедурой для статистического критерия. Статистическая значимость коэффици-

ента линейного тренда зависит от продолжительности ряда и при длине ряда 48 лет статистическим значимым при 5 %-ном уровне значимости будет уже коэффициенты корреляции, начиная с $R = 0,27$, что дает еще недостаточно эффективную модель временного ряда.

Вместе с тем, период с наибольшей нестационарностью приходится у всех трех методов на декабрь и февраль, хотя максимум может варьироваться в течение года. Второй всплеск нестационарности внутри года также по всем трем методам приходится на май и сентябрь. Число же нестационарных дисперсий, установленных по критерию Фишера, также имеет максимум зимой.

Таким образом, по итогам выполненной работы получены следующие основные выводы:

- многолетние ряды среднемесячных атмосферных осадков на территории Якутии не являются полностью стационарными;
- из двух рассмотренных нестационарных моделей модель ступенчатых изменений является более эффективной (почти в 4 раза) для описания межгодовых изменений атмосферных осадков по сравнению с широко применяемой в настоящее время моделью линейного тренда и ступенчатый рост/ступенчатое снижение атмосферных осадков относится в большинстве случаев к 1980–1990 гг. XX в.;
- во внутригодовом распределении нестационарности имеют место два максимума: в холодный период (декабрь–февраль) и несколько меньший в теплый период (июнь и сентябрь);
- при сравнении с методами оценки стационарности (критерий Стьюдента и статистическая значимость линейного тренда) получены аналогичные выводы о динамике нестационарности внутри года, что и по модели ступенчатых изменений.

Следовательно, можно констатировать, что современные изменения атмосферных осадков в Якутии весьма неоднородны в пространстве и времени, вплоть до противоположных по знаку тенденций в разные сезоны года.

Литература

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. — М.: Мир, 1974. — 406 с.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. — М.: Статистика, 1973. — 392 с.
3. Закс Л. Статистическое оценивание. — М.: Статистика, 1976. — 598 с.
4. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии. Часть 1. — СПб.: РГГМУ, 2011. — 145 с.
5. Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е. Практикум по климатологии. Часть 2. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 180 с.
6. Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г. Проявление современных изменений климата на территории Костромской области. — Кострома: ФГБУ «Костромской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», 2013. — 179 с.
7. Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Определение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. — СПб.: РГГМУ, 2013. — 164 с.
8. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. // Метеорология и гидрология, 2004, № 4, с. 50–66.
9. Лобанов В.А., Лемешко Н.А., Жильцова Е.Л., Горлова С.А., Ренева С.А. Методы восстановления многолетних рядов температуры воздуха. // Сборник работ по гидрологии, 2004, № 27, с. 54–68.

10. Лобанов В.А., Лемешко Н.А., Жильцова Е.Л., Горлова С.А., Ренева С.А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России. // *Метеорология и гидрология*, 2005, № 2, с. 5–14.
11. Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений. // *Учёные записки РГГМУ*, 2010, № 14, с. 73–88.
12. Мелешко В.П., Голицын Г.Г., Говоркова В.А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей. // *Метеорология и гидрология*, 2004, № 4, с. 38–49.
13. Пономарев В.И., Каплуненко Д.Д., Крохин В.В. Тенденции изменений климата во второй половине XX века в Северо-Восточной Азии, Аляске и северо-западе Тихого океана. // *Метеорология и гидрология*, 2005, № 2, с. 15–26.
14. Определение основных расчетных гидрологических характеристик: СП 33-101-2003. — М.: Госстрой России, 2004. — 73 с.
15. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. ГГИ. — Л.: Гидрометеиздат, 1984. — 78 с.
16. Официальный сайт ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова». Раздел «Изменение климата в России в XXI веке (модели CMIP 5)». — Электронный ресурс: [<http://voeikovmgo.ru/izmenenie-klimata-v-rossii-v-xxi-veke?id=613>].
17. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M.M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. — Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sro Paolo, Delhi, Mexico City, Cambridge University Press. — 1552 p.
18. Taylor K.E., Stouffer J.R., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and experiment design. *Bull. American Meteorological Society*, 2012, pp. 485–498.