

УДК 614.841

Оценка применимости авторегрессионных моделей изменчивости месячных сумм атмосферных осадков для ее прогнозирования (на примере Черемховского района Иркутской области)

Холопцев А.В.^{1,2}, д-р. геогр. наук, профессор; Шубкин Р.Г.¹, канд. техн. наук; Сутупов Г.Л.¹

¹*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России*

²*Севастопольский филиал Государственного института океанографии*

Аннотация. На примере территории Черемховского района Иркутской области показано, что для многих участков земной поверхности прогнозы с заблаговременностью 1 год межгодовых изменений месячных сумм атмосферных осадков, для месяцев повышенной пожароопасности, которые разработаны с применением авторегрессионных моделей этого процесса, существенно точнее, чем прогнозы, полученные с применением традиционной методики. Такие прогнозы целесообразно учитывать при разработке планов основных мероприятий подразделений ГПС МЧС России.

Ключевые слова: прогноз, месячные суммы атмосферных осадков, Черемховский район, авторегрессионная модель, устойчивость, абсолютная погрешность.

Assessment of the applicability of autoregressive models of variability of monthly sums of atmospheric precipitation to predict it (on the example of the Cheremkhovsky district of the Irkutsk region)

Kholoptyev A.V.^{1,2}, Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Geographic Sciences, Full Professor; Shubkin R.G.¹, Ph.D. of Engineering Sciences; Sutupov G.L.¹

¹*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia*

²*Sevastopol branch of Government Oceanography Institute*

Abstract. On the example of the territory of the Cheremkhovsky district of the Irkutsk region, it is shown that for many parts of the earth's surface, forecasts with a lead time of 1 year of interannual changes in monthly amounts of atmospheric precipitation, for months of increased fire hazard, which are developed using autoregressive models of this process, are much more accurate than the forecasts obtained using traditional technique. As a result, it is advisable to take such forecasts into account when developing plans for the main activities of the units of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia.

Key words: forecast, monthly sums of atmospheric precipitation, Cheremkhovsky region, autoregressive model, stability, absolute error.

Введение

Месячные суммы атмосферных осадков (далее – МСО), выпадающие на лесопокрытой территории, во многом определяют степень увлажненности ее растительности, валежника и почв, которая существенно влияет на вероятность возникновения и развития на ней пожара. Совершенствование методик разработки прогнозов этих показателей для различных месяцев предстоящего года, которые учитываются при разработке планов основных мероприятий подразделений ГПС МЧС России, является актуальной проблемой пожарной безопасности при ЧС.

Наибольший интерес решение рассматриваемой проблемы представляет для районов России, обладающих значительными лесными ресурсами, на территории которых расположены крупные месторождения углеводородов. Одним из них является Черемховский район Иркутской области.

Черемховский район основан в 1926 году, расположен в юго-западной части Иркутской области, занимает выгодное экономико-географическое положение по отношению к крупнейшим городам Иркутской области. Площадь района составляет 9,9 тыс. кв. км (1,3% территории Иркутской области). Район граничит с четырьмя муниципальными объединениями региона и Республикой Бурятия. В состав территории Черемховского района входит 1 городское и 17 сельских поселений, которые включают 100 населенных пунктов.

Общая численность населения Черемховского района на 1 января 2021 года составляет 27677 человек или 1,2% численности населения Иркутской области.

Район богат природными ресурсами, его природно-ресурсный потенциал составляет 7,7% от суммарного по области (4-е место среди административных районов), лесами покрыто 675,7 тыс. га. Полезные ископаемые района принадлежат, в основном, к группам топливно-энергетических ресурсов и нерудного сырья для металлургии (каменный уголь, магнезиты).

Отличительной чертой Черемховского района является ярко выраженная инвестиционная привлекательность. Источниками таковой является развитие аграрного сектора, разработка перспективных месторождений и повышение социальной привлекательности района.

Изменчивость МСО является многофакторным процессом [2]. Изменения многих характеристик атмосферы и ландшафтов, которые значимо влияют на межгодовые изменения МСО на той или иной местности, являются ненаблюдаемыми, и рассматриваются как случайный процесс.

Прогнозы усредненных характеристик метеоусловий, к которым относятся и МСО, принято называть ориентировочными [4].

Проблема разработки прогнозов МСО, с заблаговременностью единицы месяцев, которые учитывают основные причины их изменений, в настоящее время не решена при планировании многих видов хозяйственной деятельности, приходится учитывать прогнозы, разработанные с использованием тех или иных приближенных подходов.

Один из таких подходов, рекомендованный к использованию при разработке планов основных мероприятий подразделений ГПС МЧС России (далее — традиционный), предполагает учет в качестве прогноза для предстоящего года значений МСО на изучаемой территории, климатических норм (далее — КН) этого показателя [5]. Значения КН для той или иной местности представлены в справочниках Росгидромета.

Необходимо отметить, что при традиционном подходе к планированию межгодовые изменения МСО не учитываются. В результате этого абсолютные погрешности прогнозов МСО в Сибири, как правило, сопоставимы со значениями их КН, а планы подразделений, основанные на их учете, не всегда являются реалистичными. Следовательно, изучение возможностей прогнозирования МСО с применением иных подходов представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Один из таких подходов предполагает использование в качестве прогноза на предстоящий год значений МСО для того или иного месяца, результата статистической экстраполяции временного ряда [1], описывающего межгодовые изменения этого показателя. Такой прогноз оправдан при рассмотрении его как суммы случайной и детерминированной составляющей при условии стационарности процесса.

Реальность демонстрирует изменчивость любого процесса, что зависит от временного фактора.

Для некоторых участков лесных территорий России и для ряда месяцев повышенной пожароопасности, абсолютные погрешности СП МСО предстоящего года, могут быть меньше аналогичных показателей их традиционных прогнозов, поскольку будущее не предопределено, а количество возможных его сценариев бесконечно.

Одним из наиболее универсальных методов моделирования временных рядов, является метод множественной регрессии [3], который позволяет находить решения указанной задачи, являющиеся оптимальными по критерию минимум среднеквадратической ошибки [7]. В простейшем случае в качестве предикторов множественно-регрессионной модели некоторого отрезка изучаемого временного ряда могут использоваться аналогичные по продолжительности его отрезки, которые начинаются в более ранние моменты времени. При этом такая модель является авторегрессионной.

Необходимым условием применимости авторегрессионных моделей для разработки регрессионных прогнозов временных рядов, является их устойчивость к соответствующим временным сдвигам.

Информация об изменениях средней интенсивности атмосферных осадков на каком-либо участке земной поверхности, в том числе, на территории Черемховского района, за каждый час из периода 00.01.01.1950-23.31.12.2020 гг. может быть получена из реанализа ERA 5 [13, 14].

Указанный реанализ представлен Европейским центром среднесрочных прогнозов, производится службой по изменению климата Copernicus и относится к пятому поколению атмосферных реанализов глобального климата. Он получен с применением глобальной атмосферной модели, которая верифицирована с применением информации от искусственных спутников Земли TRMM и GPM (NASA) [12]. При ассимиляции спутниковой информации используется цикл 41r2 Интегрированной системы прогнозирования (IFS).

Ранее абсолютные погрешности СП на предстоящий год МСО в каких-либо лесных регионах мира оценены не были, что не позволяет учитывать их при планировании каких-либо видов человеческой деятельности.

Целью данной работы является проверка выдвинутой гипотезы на примере территории Черемховского района Иркутской области.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Оценка абсолютных погрешностей традиционных прогнозов МСО для месяцев повышенной пожароопасности предстоящего года на территории Черемховского района Иркутской области.
2. Определение оптимальных параметров авторегрессионных моделей изучаемых процессов, а также разработка с их применением СП МСО для месяцев повышенной пожароопасности, которые характеризуются заблаговременностью 1 год.
3. Оценка устойчивости этих моделей к временному сдвигу рассматриваемых временных рядов на 1 год, а также абсолютных погрешностей соответствующих СП.

Фактический материал и методика исследования

Для решения задач об изменениях МСО, которые происходили на территории Черемховского района Иркутской области, использована информация, реанализа ERA5. Она охватывает период времени 00.01.01.1950-24.31.12.2020 гг. и соответствует всем пунктам земной поверхности, расположенным в узлах координатной сетки с шагом $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [13, 14].

Адекватность упомянутой информации подтверждена путем ее сопоставления с результатами наземных наблюдений в некоторых пунктах мира [11]. Она подтверждена также при сравнении сведений о распределении по территории Сибири толщины снежного покрова из реанализа ERA5, с данными, полученными при ее фактических измерениях [8].

Методика исследований предполагала преобразование сведений о часовых интенсивностях атмосферных осадков во всех пунктах территории Черемховского района, которые содержатся в ERA5, во временные ряды МСО.

При решении первой задачи для всех месяцев с апреля по октябрь и всех пунктов территории Черемховского района, совпадающих с узлами координатной сетки реанализа ERA5, вычислены значения среднеквадратических отклонений (далее – СКО) традиционных прогнозов МСО для месяцев с апреля по октябрь предстоящего года ($G(t+1)$), которые определялись как:

$$G(t+1) = KH(t-30; t), \quad (1)$$

где $KH(t-30; t)$ – значение KH рассматриваемого процесса, вычисленное за отрезок времени от $t-30$ до t .

При решении второй задачи, с использованием метода наименьших квадратов, вычислялись оптимальные значения C_0 и C_k — коэффициентов авторегрессионной модели $Y(t)$ временного ряда межгодовых изменений МСО предстоящего года в период с 2000 г. по 2019 г.:

$$Y(t) = C_0 + \sum C_k \text{МСО}(t-k), \quad (2)$$

где k изменяется в пределах от 1 до 10 с шагом 1;

t – в пределах: 2000...2019 г. с шагом 1.

Нетрудно видеть, что как предикторы модели рассматривались временные ряды межгодовых изменений МСО в период с 2000-к г. по 2019 г. – к ($k=1, 2, \dots, 10$), соответствующие каждому пункту территории Черемховского района и каждому месяцу.

Также для каждого t вычислены значения $Y(t+1)$, с использованием C_0 и C_k , которые были определены для модели ряда МСО(t) за 2000-2019 гг.

Значения $Y(t+1)$ для того или иного пункта Черемховского района рассматривались как СП МСО на соответствующий месяц года $t+1$.

При решении третьей задачи сопоставлены значения коэффициента корреляции временных рядов МСО(t) и $Y(t)$, а также МСО($t+1$) и $Y(t+1)$, в которых скомпенсированы линейные тренды. Это позволило выявить участки территории района, на которых разрабатываемые прогнозы могут быть более адекватными.

Также для каждого изучаемого месяца и каждого рассматриваемого пункта на территории Черемховского района оценены значения СКО разности МСО($t+1$) и $Y(t+1)$ (в соответствующих рядах тренды скомпенсированы).

Результаты исследования и их анализ

При решении первой задачи для каждого изучаемого пункта Черемховского района и каждого месяца с апреля по октябрь определены значения $КН(t-30; t)$, где t изменялось в пределах 1980-2020, с шагом 1 (табл. 1).

Таблица 1. Оценки КН МСО (1991-2020 гг.) для различных пунктов Черемховского района Иркутской области и месяцев повышенной пожароопасности, мм

	апрель						Май					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	87	85	86	85	84	85	99	94	96	95	92	93
53	85	83	85	85	83	85	92	88	92	92	88	90
52,75	83	86	86	85	84	86	86	90	92	92	87	91
52,5	84	86	86	86	85	87	85	90	93	94	90	95
52,25	84	84	84	84	85	84	85	87	89	90	93	93
	июнь						Июль					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	90	85	88	91	91	92	93	85	94	98	101	107
53	87	84	89	92	89	91	87	84	98	106	106	109
52,75	84	89	93	94	89	95	86	99	107	111	108	120
52,5	86	92	96	98	94	108	94	103	110	114	111	136
52,25	90	92	96	99	100	100	97	103	110	116	116	118
	август						сентябрь					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	80	76	84	91	94	101	112	108	109	107	102	106
53	80	78	90	99	100	107	107	102	106	106	101	107
52,75	82	92	101	107	106	116	102	104	106	107	104	111
52,5	90	99	107	112	111	127	103	106	107	108	107	115
52,25	96	104	110	115	116	115	105	108	109	111	112	111
	октябрь											
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25						
53,25	87	84	87	89	87	92						
53	85	84	89	91	89	93						
52,75	86	90	91	92	91	94						
52,5	92	94	94	93	92	96						
52,25	94	96	94	92	92	94						

В современном периоде максимальные значения КН МСО соответствуют июлю и августу, а также юго-восточной части территории изучаемого района.

Аналогичные особенности характерны и для распределений по его территории КН МСО, которые вычислены для других периодов времени.

Оценки СКО традиционных прогнозов МСО предстоящего года показали, что для всех рассматриваемых месяцев и всех изучаемых пунктов района эти показатели составляют приблизительно 96,6-97% от соответствующих значений КН.

Далее определены оптимальные значения параметров авторегрессионных моделей многолетних изменений МСО для всех месяцев с апреля по октябрь, разработаны СП этих процессов на предстоящий год.

В качестве примера на рисунке приведены фактические изменения МСО в пункте Черемховского района с координатами 52,75°с.ш., 102°75'в.д. для июля, а также их СП на предстоящий год.

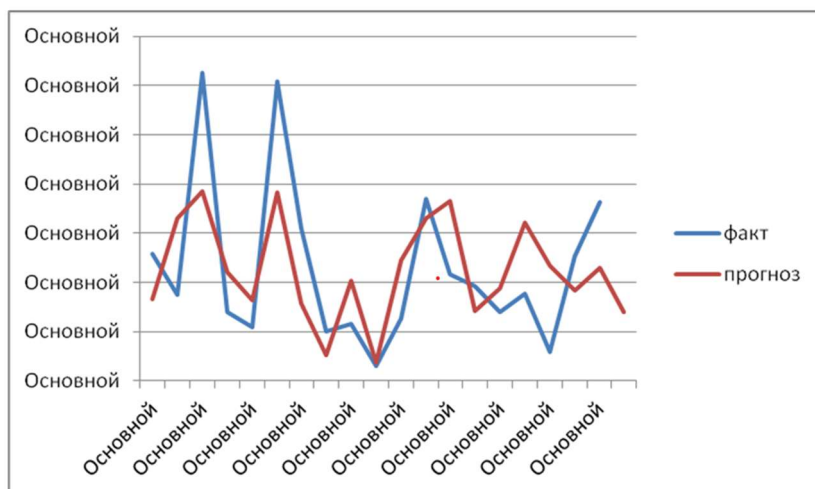


Рис. Фактические изменения МСО (м) в пункте Черемховского района с координатами 52,75°с.ш., 102°75'в.д. для июля, а также их Регрессионные прогнозы на предстоящий год

Параметры модели:

$$C_0=0,186; C_1=13,237; C_2=2,089; C_4=1,442; C_5=-1,370; C_6=2,582; C_7=-1,060; C_8=-7,688; C_9=-0,892; C_{10}=-10,509; C_{11}=-6,505.$$

Как видно на рисунке между фактическими изменениями МСО (м) в пункте Черемховского района с координатами 52,75° с.ш., 102°75' в.д. для июля, а также их СП имеет место соответствие. Наибольшие значения ошибок СП имеют место в годы, для которых значения МСО являются повышенными. В годы, для которых МСО минимально, ошибки прогнозов имеют наименьшие значения.

Далее нами определены значения коэффициента корреляции временных рядов МСО(t) и Y(t), для всех рассматриваемых месяцев и пунктов, которые вычислены с применением оптимальных авторегрессионных моделей, а также аналогичных рядов смещенных по времени в будущее на один год (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции временных рядов МСО(t) и Y(t) для летних месяцев и всех рассматриваемых пунктов (вычислены с применением оптимальных авторегрессионных моделей, а также аналогичных рядов, смещенных по времени в будущее на один год)

	Июнь						Июнь (сдвиг 1 год)					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	0,87	0,72	0,64	0,61	0,60	0,55	0,86	0,71	0,63	0,60	0,59	0,55
53	0,63	0,57	0,63	0,68	0,64	0,58	0,60	0,56	0,62	0,65	0,62	0,56
52,75	0,609	0,54	0,53	0,61	0,65	0,59	0,59	0,51	0,51	0,60	0,63	0,58
52,5	0,64	0,67	0,61	0,55	0,56	0,65	0,63	0,64	0,59	0,55	0,5	0,65
52,25	0,66	0,65	0,75	0,78	0,58	0,67	0,65	0,64	0,72	0,74	0,56	0,60
	Июль						Июль (сдвиг 1 год)					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	0,51	0,55	0,54	0,66	0,74	0,79	0,48	0,52	0,53	0,64	0,71	0,76
53	60	0,64	0,62	0,70	0,77	0,83	0,60	0,63	0,62	0,69	0,75	0,78
52,75	0,77	0,76	0,78	0,74	0,67	0,72	0,74	0,76	0,76	0,73	0,66	0,68
52,5	0,76	0,75	0,78	0,80	0,71	0,78	0,75	0,75	0,78	0,80	0,71	0,76
52,25	0,51	0,49	0,62	0,59	0,62	0,68	0,50	0,60	0,62	0,56	0,60	0,67
	Август						Август (сдвиг 1 год)					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	0,86	0,80	0,83	0,82	0,75	0,72	0,85	0,78	0,80	0,80	0,72	0,69
53	0,84	0,76	0,79	0,75	0,73	0,71	0,82	0,72	0,75	0,72	0,70	0,68
52,75	0,67	0,68	0,74	0,71	0,73	0,78	0,61	0,62	0,68	0,68	0,71	0,77
52,5	0,48	0,56	0,67	0,72	0,75	0,85	0,36	0,45	0,59	0,67	0,72	0,83
52,25	0,68	0,55	0,70	0,68	0,72	0,85	0,57	0,50	0,64	0,63	0,69	0,81

Значения коэффициентов корреляции временных рядов $MCO(t)$ и $Y(t)$, для всех рассматриваемых месяцев и пунктов, которые вычислены с применением оптимальных авторегрессионных моделей, превышают уровень 95% порога достоверной корреляции по критерию Стьюдента (который в рассматриваемых случаях равен 0,46).

При таких сдвигах рассматриваемых временных рядов значения коэффициентов их корреляции превышают порог для всех пунктов и месяцев, кроме пунктов юго-западной части территории района для августа.

Максимальные значения разности коэффициентов корреляции сопоставляемых рядов не превышают 0,12 (в юго-западной части территории), а для многих пунктов ее значения не превосходят 0,01. Аналогичные результаты получены и для прочих месяцев повышенной пожароопасности. Необходимое условие применимости рассматриваемого подхода для большинства пунктов Черемховского района Иркутской области выполняется.

В табл. 3 приведены оценки СКО прогнозов МСО в тех же пунктах территории рассматриваемого района для всех месяцев повышенной пожароопасности, которые пронормированы к соответствующим значениям КН (1991-2020).

Таблица 3. Оценки СКО/КН (1991-2020) (%) регрессионных прогнозов МСО, для различных пунктов Черемховского района Иркутской области, соответствующих месяцам повышенной пожароопасности

	апрель						май					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	18	14	10	8	7	7	24	21	15	13	13	14
53	24	19	13	11	9	8,	34	29	20	16	14	15
52,75	35	27	21	13	12	10	53	41	30	19	17	14,
52,5	41	43	38	28	17	13	66	63	55	39	24	17
52,25	41	48	49	46	37	25	68	73	80	73	53	33
	июнь						июль					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	14	30	20	17	16	16	52	49	34	29	28	26
53	46	37	26	21	19	19	65	59	39	32	27	27
52,75	70	54	40	25	23	20	88	69	53	35	30	26
52,5	92	88,	75	54	32	21	103	97	82	60	35	22
52,25	97	113	126	100	63	43	108	125	127	97	61	41
	август						Сентябрь					
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25
53,25	65	59	45	46	35	32	38	35	26	23	23	22
53	78	66	47	39	34	31	51	43	32	27	24	23
52,75	107	81	61	42	39	32	71	57	45	33	29	24
52,5	120	115	99	74	51	35	82	81	77	61	42	29
52,25	50	134	141	118	85	66	77	88	103	95	76	56
	октябрь											
	102	102,25	102,5	102,75	103	103,25						
53,25	17	16	13	12	12	11						
53	24	21	15	13	11	10						
52,75	35	28	22	16	13	10						
52,5	38	38	39	32	22	14						
52,25	37	43	49	52	47	32						

Для апреля, мая и октября оценки СКО/КН (1991-2020) (%) регрессионных прогнозов МСО для любых пунктов Черемховского района Иркутской области значительно меньше 96% (СКО/КН (1991-2020) (%) для традиционных прогнозов МСО).

Для прочих месяцев вывод справедлив для пунктов северной части территории этого района. Следовательно, применение СП при оценке пожароопасности на территории района позволяет получить некоторые выигрыши в точности таких оценок, что подтверждает справедливость выдвинутой гипотезы.

Обсуждение полученных результатов

Авторегрессионные модели межгодовых изменений МСО для месяцев повышенной пожароопасности для многих пунктов Черемховского района Иркутской области обладают высокой устойчивостью

к временным сдвигам. Абсолютные погрешности СП для подобных пунктов значительно меньше, чем для прогнозов, разработанных с применением традиционного подхода.

На территории района выявлены пункты, для которых точность СП ниже, чем прогнозов традиционных. Причины, по которым последнее имеет место, нуждаются в дополнительном изучении.

Выводы

На примере Черемховского района Иркутской области показано, что авторегрессионные модели межгодовых изменений МСО на многих участках земной поверхности обладают свойствами, которые позволяют применить их для разработки СП этих процессов предварительно на 1 год. Описываемые СП в ряде случаев значительно точнее, чем традиционные прогнозы.

Считаем, что необходимо выявлять участки территории России, для которых применение предложенного подхода к прогнозированию ППО является эффективным.

Литература

1. Анализ временных рядов. StatSoft Электронный учебник по статистике [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/sttimser.html>.
2. Воробьев Ю.Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы / Ю.Л. Воробьев, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов – М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. – 312 с.
3. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ/Н. Драйпер, Г. Смит. –М.: Диалектика, 2017 –912 с.
4. Классификация метеорологических прогнозов. Сайт Гидрометцентра России [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://meteoinfo.ru/categ-articles/8-forecast-cat/1250-1246618396>.
5. Методические рекомендации по разработке плана действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера субъекта Российской Федерации [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200134263>.
6. Официальный портал Черемховского района [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://cher.irkobl.ru/about/index.php>.
7. Прокис Джон. Цифровая связь. Пер. с англ./Под ред. Д.Д. Кловского.–М.:Радио и связь, 2000.– 800с
8. Рубинштейн К. Анализ характеристик снежного покрова для бассейнов крупных российских рек по результатам численных экспериментов, данным наземных и спутниковых наблюдений, а также NCAR/NCEP (США) и ERA (Европейский центр среднесрочных прогнозов) реанализов / К. Рубинштейн, В. Хан, С. Громов [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.scert.ru/conferences/cites/2005/presentation/Presentation/Conference/Session%206/Rubinsteinpps>
9. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм // ВМО. – № 1203. – 2017. – 32 с.
10. Шерстюков Б.Г. Лесные пожары [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://docplayer.ru/28030564-Glava-7-lesnye-pozhary-b-g-sherstyukov-vvedenie-factory-pozharoopasnosti-v-lesah.html>.
11. Bridging the Gap: Connecting Ecologists to Earth Data [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://gpm.nasa.gov/applications/bridging-gap-connecting-ecologists-earth-data>.
12. IMERG: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM | NASA [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://gpm.nasa.gov/data/imerg>.
13. Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. 2016. Vol. 147. P. 7.
14. Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O. et al. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF’s next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atm. Chem. Phys. 2019. Vol. 19. P. 3097-3124.
15. Hersbach H. The ERA5 глобальный реанализ. QJR Meteorol Soc [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/qj.3803>.