

УДК 551.524: 519.242

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ВОЗДУХА НА МЕЛИОРИРОВАННЫХ  
БОЛОТАХ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ  
СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

**Н.К. Вахонин**, кандидат технических наук  
**Г.А. Писецкий**, кандидат технических наук  
(Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси)

Водный и тепловой режимы являются определяющими в формировании урожаев сельскохозяйственных культур и экологического состояния мелиорированных водосборов. Они формируются под действием мелиоративной сети и комплекса взаимосвязанных факторов внешней среды и, прежде всего, атмосферных осадков и температуры воздуха приземного слоя, определяющих основные приходные и расходные составляющие водного баланса (осадки и испарение) территории. Соответственно, их величины определяют гидрологический режим мелиоративной сети и естественных водотоков, увлажненность почвы, режим грунтовых вод и, как следствие, продуктивность сельскохозяйственных культур.

При этом в связи со случайным характером входных погодноклиматических воздействий в детерминистических моделях динамики воды и формирования урожайности сельскохозяйственных культур, необходимых при оптимизации сельскохозяйственного использования мелиорированных земель и параметров мелиоративных систем при реконструкции, они должны задаваться стохастически [1].

Ранее нами разработаны методы генерирования случайных величин осадков и уровней воды в водотоках [2, 3]. В данной работе излагается методика моделирования температурного режима приземных слоев воздуха с использованием аппарата теории случайных процессов. Для анализа и расчетов использовались материалы многолетних мониторинговых наблюдений за температурным режимом, накопленные в базе данных. Режимные ежедневные измерения суточного хода температуры воздуха осуществля-

лись синхронно с частотой 10 раз в сутки на высоте 0,5 м и 2,0 м на агро- и водно-балансовых участках, расположенных в бассейнах р. Ясельда и р. Нарев на Пружанском стационаре.

Для изучения закономерностей и эффективной обработки накопленной информации разработано программное приложение, позволяющее формировать необходимые обобщенные структуры данных требуемого уровня агрегированности и находить статистические параметры распределений исследуемых процессов, не прибегая к использованию специализированных статистических пакетов.

Для изучения влияния антропогенных воздействий на температурный режим приземных слоев воздуха были проанализированы многолетние данные наблюдений за ходом температур на трех метеостанциях: АБУ-1 (суходол), АБУ-2 (освоенное болото) и АБУ-4в (неосушенное болото).

Из базы данных были выбраны для каждого пункта наблюдений согласованные ряды среднесуточных температур за многолетний период. Эти ряды данных были протестированы с целью определения существенности различий полученных выборок на различных участках наблюдений. Для этого использовался критерий Стьюдента для проверки выборочных средних и критерий Фишера для оценки выборочных дисперсий. Полученные данные приведены в табл. 1 (обозначения:  $m$  – выборочное среднее,  $t$ ,  $F$  – расчетные значения критериев Стьюдента ( $t$ ) и Фишера ( $F$ ),  $P$  – вероятность,  $\sigma$  – выборочная дисперсия).

**Таблица 1. Результаты тестирования среднесуточных температур**

Сравнение рядов 1 и 2	$m$ ряд 1	$m$ ряд 2	$t$ значение	$P$ , %	$\sigma$ ряд 1	$\sigma$ ряд 2	$F$ значение	$P$ , %
на высоте 0,5 м								
АБУ-1 с АБУ-2	6.74	5.01	7.36	0	9.3	8.03	1.34	0
АБУ-1 с АБУ-4в	6.74	6.62	0.48	62	9.3	9.15	1.03	4
АБУ-4в с АБУ-2	6.62	5.01	6.91	0	9.15	8.03	1.29	0
на высоте 2,0 м								
АБУ-1 с АБУ-2	6.47	4.89	7.31	0	9.53	7.71	1.52	0
АБУ-1 с АБУ-4в	6.47	6.48	0.06	95	9.53	9.51	1.04	94
АБУ-4в с АБУ-2	6.48	4.89	7.39	0	9.51	7.71	1.51	0

Данные таблицы свидетельствуют о том, что ряды наблюдений имеют существенное различие на высоте 0,5 м, т.е. что различие в температурном режиме значимо и не может быть объяснено случайными факторами. Что касается высоты 2 м, то здесь картина несколько иная. На осушенном болоте по-прежнему остаются существенными различия, как с суходолом, так и с неосушенным болотом, а на суходоле и неосушенном болоте нет оснований утверждать о различии при уровне значимости 5 % для выборочного среднего и при уровне значимости 6 % по дисперсии.

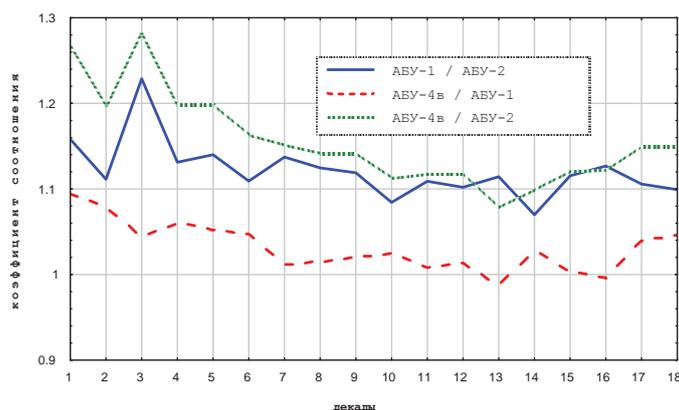
Аналогичные расчеты осуществлены для декад вегетационного периода (апрель-сентябрь). Осредненные по каждой декаде вегетационного периода, а затем для каждой декады по всем годам наблюдений значения температур воздуха приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Среднедекадные температуры воздуха на высоте 0,5 м**

Месяц	декада	АБУ-1	АБУ-2	АБУ-4в
Апрель	1	5,42	4,68	5,93
	2	5,79	5,21	6,24
	3	9,29	7,56	9,7
Май	1	11,38	10,06	12,06
	2	13,93	12,22	14,65
	3	14,53	13,10	15,22
Июнь	1	16,66	14,65	16,86
	2	15,53	13,81	15,76
	3	16,57	14,81	16,91
Июль	1	17,24	15,9	17,68
	2	17,5	15,78	17,64
	3	17,63	16	17,87
Август	1	19,4	17,4	18,77
	2	17,5	16,03	17,62
	3	16,05	14,39	16,12
Сентябрь	1	13,78	12,23	13,73
	2	12,13	10,97	12,61
	3	10,64	9,68	11,13

Построенные по этим данным графики коэффициентов соотношений между сравниваемыми рядами подекадных температур

воздуха для сравниваемых территорий (см. рисунок) наглядно показывают тенденции их соотношений.



**Соотношение средних за декаду температур воздуха на суходоле (АБУ-1), освоенном (АБУ-2) и неосушенном (АБУ-4в) болотах на высоте 0,5 м.**

Статистические оценки существенности различий между сравниваемыми рядами декадных данных, полученные аналогично среднесуточным значениям, приведены в табл. 3.

**Таблица 3. Результаты тестирования среднедекадных температур**

Сравнение рядов 1 и 2	m ряд 1	m ряд 2	t значение	P, %	σ ряд 1	σ ряд 2	F значение	P, %
АБУ-1 с АБУ-2	13,92	12,47	1,1	27	4,06	3,77	1,16	76
АБУ-1 с АБУ-4в	13,92	14,25	0,25	81	4,06	3,91	1,07	88
АБУ-4в с АБУ-2	14,25	12,47	1,39	17	3,91	3,77	1,08	88

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что с укрупнением периода осреднения различия сглаживаются, но и в этом случае средние температуры на осушенном болоте значительно отличаются от остальных, хотя по отклонениям (дисперсии) эти различия ослабевают.

Как показывают результаты обработки материалов наблюдений, ряды данных по температуре воздуха обладают автокорреляционными свойствами. Переходя к моделированию температур воздуха методом Монте-Карло, прежде всего необходимо отметить, что анализ автокорреляционных функций рядов среднесуточных температур свидетельствует о наличии внутрирядной связи, т.е. о существовании зависимости текущих значений ряда от значений ряда в предшествующие моменты времени. Поэтому моделирующий алгоритм должен разрабатываться с учетом автокорреляционных свойств температурных рядов.

Построение моделирующего алгоритма для имитации (разыгрывания) температурного режима воздуха основывается на использовании аппарата теории случайных процессов.

Разработанный алгоритм моделирования реализуется с помощью следующих шагов.

1. Для каждой даты календарного года находятся оценки математического ожидания и корреляционных моментов по формулам:

$$M_x(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i(t_j), \quad j = 1, 2 \dots m, \quad (1)$$

$$R_x(t_j, t_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [X_i(t_j) - M_x(t_j)][X_i(t_k) - M_x(t_k)]. \quad (2)$$

В частности, при  $j=k$  корреляционный момент представляет собой статистическое значение дисперсии соответствующего сечения

$$D_x(t_j) = R_x(t_j, t_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [X_i(t_j) - M_x(t_j)]^2; \quad (3)$$

2. Осуществляется нормировка исходных данных

$$h_i(t_j) = \frac{x_i(t_j) - m(t_j)}{s(t_j)} \quad j = 1, 2 \dots m \quad i = 1, 2 \dots n; \quad (4)$$

3. Вычисляется корреляционная функция для смежных дат

$$r_x(t_j, t_k) = \frac{R_x(t_j, t_k)}{\sigma_x(t_j) \sigma_x(t_k)}, \quad (5)$$

где  $\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}$  – среднеквадратическое отклонение;

4. Датчиком случайных чисел генерируется случайное равномерно распределенное число  $z$  из интервала  $(0,1)$ .

5. Используя сгенерированное значение  $z$ , находится соответствующее значение  $\xi$  нормально распределенной величины с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1. Моделирование последней для существенного сокращения вычислительного процесса осуществляется на основании аппроксимационной зависимости [4]:

$$\xi(z) \approx -\theta + \frac{2.515517 + 0.802853 \theta + 0.01328 \theta^2}{1 + 1.432788 \theta + 0.189269 \theta^2 + 0.001308 \theta^3} \quad (6)$$

где  $\theta = \sqrt{-2 \ln(z)}$ ,  $0.5 < z < 1$ .

Ошибка такой аппроксимации по модулю менее 0.00045 при  $z < 0.9$ .

6. Расчет последующего значения  $\eta_{j+1}$  осуществляется по рекуррентной зависимости

$$\eta_{j+1} = r_j \eta_j + \xi_{j+1} \sqrt{1 - r_j^2}, \quad (7)$$

где  $\xi_{j+1}$  – последовательность независимых нормально распределенных случайных величин с параметрами  $(0,1)$ ,  $r_j$  – коэффициент корреляции между смежными сечениями в момент времени  $t_j$  и  $t_{j+1}$ .

7. Осуществляется переход к величинам с исходными параметрами, т.е. выполняется операция обратная нормировочной

$$x_j(t_i) = \eta_j(t_i) \sigma(t_i) + m_j(t_i). \quad (8)$$

8. Для каждого последующего дня расчет повторяется с шага 4.

9. Формируется выводной файл, содержащий смоделированные значения температуры воздуха по рассматриваемому пункту наблюдений.

Путем N-кратного повторения опыта генерируются теоретические ряды длиной N лет.

Реализация описанного алгоритма осуществлялась по материалам режимных наблюдений Пружанского стационара.

Для оценки соответствия статистических характеристик теоретических и наблюдаемых рядов были выполнены несколько серий расчетов, содержащих разыгранные сценарии соответственно на 1, 5, 10 и 20 лет для АБУ-1. Статистические параметры каждой из серий сравнивались между собой и со значениями, полученными из наблюдаемых многолетних рядов. В табл. 4 приведены статистические характеристики, определенные для многолетних фактических данных и различных смоделированных сценариев.

**Таблица 4. Статистические показатели фактических и сгенерированных временных рядов**

Данные	Среднее	Сумма	Минимум	Максимум	Дисперсия	Ошибка средней	
Фактические за 20 лет	6,74	2463	-7	19,7	8,31	0,43	
Сгенерированные значения	1 год	8,4	2634	-19	28	6,82	0,52
	5 лет	6,3	2301	-11,3	21,3	8,81	0,46
	10 лет	6,91	2556	-8,1	20,6	8,45	0,45
	20 лет	6,71	2467	-7,8	19,9	8,58	0,44

Сравнение статистических показателей наблюдаемых и сгенерированных рядов (табл. 4) показывает, что с увеличением N полученные статистические характеристики сгенерированных рядов приближаются к значениям, найденным по исходным рядам наблюдений.

Таким образом, полученные теоретические ряды отражают основные черты наблюдаемых данных, их статистические характеристики стремятся к характеристикам исходных рядов, т.е. по вероятности они стремятся к рядам натуральных наблюдений.

### Литература

1. Вахонин Н.К. Системный анализ моделирования природно-технических систем в применении к мелиоративным сельскохозяйственным объектам. // Мелиорация переувлажненных земель: Сб. научн. работ БелНИИМиВХ. Т. XLII. – 1995. – С. 45-74.
2. Вахонин Н.К., Писецкий Г.А. Стохастическое моделирование осадков при планировании мероприятий по трансформации мелиоративных систем. // Современные проблемы стохастической гидрологии. Тр. конференции РАН. М., 2001. – С. 191-193.
3. Вахонин Н.К., Писецкий Г.А. Использование методов Монте-Карло для генерирования рядов уровней воды в водотоках // Мелиорация переувлажненных земель: Сб. научн. работ БелНИИМиЛ. Т. 50. – Мн., 2003. – С. 29-36.
4. Харин Ю.С., Степанова М.Д. Практикум на ЭВМ по математической статистике. – Мн.: Университетское, 1987. – 175 с.

### Резюме

Рассмотрена методика генерирования температурного режима приземных слоев воздуха, статистически подобных наблюдаемым ранее многолетним данным. Для анализа и расчетов использованы материалы мониторинговых наблюдений по Пружанскому стационару, осуществляемых с частотой 10 раз в сутки на высотах 0,5 и 2,0 м на осушенном болоте, прилегающих к нему минеральных землях и на неосушенном болоте. Обработывались ряды более чем двадцатилетней продолжительности. Процесс генерирования температур воздуха осуществлялся методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) с использованием аппарата марковских цепей.

**Ключевые слова:** температурный режим, случайный процесс, моменты распределения, дисперсия, стохастическое моделирование.

### Summary

**Vakhonin N., Pisetskiy G. Temperature condition off air on reclaimed bogs and its simulation with a statistical test method.**

The procedure of generation of temperature condition of close-to-earth layers of air, similar statistically to data observed earlier in long-term period is considered. Data of monitoring observations at the Pruzhany permanent establishment carried out with frequency 10 times per day at heights 0,5 and 2,0 m on drained bogs, on adjacent to it mineral lands and on undrained bog utilized or analyses and accounts. Series more than twenty years' duration were processed. The process of generation of air temperatures was carried out with a method of statistical tests (Monte Carlo method) using techniques of Markov chains.

**Key words:** temperature condition, stochastic process, moments of a distribution, dispersion, stochastic simulation.