

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.575.1

## Формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей

Н.Я. Шапарев, А.В. Токарев<sup>✉</sup>, О.Э. Якубайлик\*

*Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44*

Поступила в редакцию 1.03.2022 г.;  
после доработки 15.03.2022 г.;  
принята к печати 1.04.2022 г.

Рассматривается формирование туманов в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на реке Енисей в течение 2020 г. Метеорологические условия, соответствующие времени формирования туманов, фиксировались на геопортале, разработанном авторами, температура воды определялась на гидропосту, а регистрация туманов выполнялась с помощью веб-камер. Анализ данных показал, что в летний период образуются адвективные туманы охлаждения, а зимой, ранней весной и осенью – адвективные туманы парения. Туманы охлаждения формируются путем охлаждения влажного воздуха при взаимодействии нижнего слоя атмосферы с более холодной движущейся поверхностью воды. Туманы парения образуются при адвективном охлаждении паров воды на поверхности реки более холодной примыкающей атмосферой. Определяется пространственное распределение туманов парения вдоль реки на основе данных дистанционного зондирования.

*Ключевые слова:* туман, река Енисей, метеоусловия, температура воды, дистанционное зондирование; fog, Yenisei River, meteorological conditions, water temperature, remote sensing.

### Введение

Загрязнение атмосферы Земли обусловлено природными и антропогенными процессами – песчаными бурями и извержениями вулканов, добычей и сжиганием природного сырья, лесными и сельскохозяйственными пожарами. Выбросы вредных веществ от предприятий и автотранспорта негативно влияют на качество атмосферного воздуха современного промышленного города. Если город расположен на берегах реки, то она может оказывать заметное влияние на его микроклимат, уровень загрязнения атмосферы. Образование туманов на реке является одним из существенных факторов, определяющих качество городского воздуха. Согласно международной классификации помутнение атмосферы называется туманом, если видимость составляет менее 1 км [1]. Туманы влияют на движение авиационного, морского, автомобильного, речного транспорта, городские постройки, линии электропередач, экологию и здоровье населения.

Образование, существование и распад тумана – результат сложных взаимодействий между микрофизическими, термодинамическими и динамическими процессами [2]. Наиболее изучены туманы, связанные с радиационным охлаждением суши [3–7].

Другой тип тумана – туманы парения, обычно наблюдаются в Арктике и возникают в результате адвекции холодного воздуха с низким давлением пара над относительно теплой поверхностью воды [8–10]. Численному моделированию образования и развития туманов с учетом синоптической обстановки посвящена работа [11], а в [12] выполнено сравнение нескольких численных методов прогноза туманов.

Изменение естественного режима рек, связанное с их зарегулированностью, может приводить к заметным изменениям характеристик окружающей природной среды. Например, строительство плотины Красноярской ГЭС стало причиной формирования туманов в осенне-зимний период на участке Енисея вниз по течению реки от плотины Красноярской ГЭС (нижний бьеф). В настоящей работе проводится анализ данных по формированию туманов на указанном участке реки в 2020 г.

### 1. Объект исследования

Река Енисей по объему стока – крупнейшая в России (599 км<sup>3</sup>/год) и седьмая в мире (1,5% мирового стока) [13]. В бассейне реки построено шесть гидроэлектростанций (ГЭС). Одна из них – Красноярская ГЭС, ключевой антропогенный фактор, влияющий на р. Енисей. Выше по течению перед плотиной создано водохранилище объемом 73 км<sup>3</sup>, в котором вода охлаждается в зимнее время. В зависимости от климатических и экономических условий

\* Николай Якимович Шапарев (shaparev@icm.krasn.ru); Алексей Владимирович Токарев (tav@icm.krasn.ru); Олег Эдуардович Якубайлик (oleg@icm.krasn.ru).

расход воды Красноярской ГЭС  $Q$  колеблется от 2000 до 8000 м<sup>3</sup>/с. Температура воды, поступающей в нижний бьеф в течение года, варьируется от 2 до 12 °С. Ниже по течению от ГЭС летняя температура воды ниже, а зимняя выше, чем до зарегулирования реки. Поэтому зимой в нижнем бьефе образуется полынья протяженностью до 300 км. В летнее время температурный режим реки возвращается к естественному ниже 700 км от плотины. В результате изменились гидротермический, гидробиологический, гидрохимический, рекреационный и климатический режимы [14]. Скорость течения реки  $V = 1,5$  м/с при характерных значениях  $Q = 3000$  м<sup>3</sup>/с и поперечном сечении реки  $S = 2000$  м<sup>2</sup>.

Созданный термический режим реки в нижнем бьефе способствует образованию туманов над поверхностью реки. На расстоянии 40 км от плотины ГЭС находится долина, в которой расположен г. Красноярск. Образующиеся речные туманы растекаются по этой долине и влияют на транспортное движение и здоровье населения в городе.

## 2. Инструменты и процедура исследования

Формирование туманов в Красноярске фиксировалось визуально и с помощью веб-камер. Анализ метеоусловий (атмосферное давление, относительная влажность и температура воздуха, скорость и направление ветра, концентрация РМ<sub>2,5</sub>) выполнялся на основе данных девяти постов наблюдения. Данные с интервалом в 20 мин передаются в Краевую ведомственную информационно-аналитическую систему о состоянии окружающей среды Красноярского края и далее в реальном режиме времени обрабатываются на геопортале, созданном авторами [15]. Температура воды в р. Енисее измерялась ежедневно в 08:00 на городском водозаборе «Гремячий Лог». После анализа данных метеонаблюдений и температуры воды в реке определялся вид тумана.

В настоящей работе также рассматривались данные дистанционного зондирования с высоким пространственным разрешением 10–30 м/пиксель со спутников Sentinel-2 и Landsat-8 в условиях туманов.

## 3. Результаты

Основными параметрами атмосферы при изучении туманов являются: относительная влажность и температура воздуха, направление и скорость ветра, а также температура поверхности реки, на границе с которой происходит формирование туманов. Туманы возникают, когда относительная влажность воздуха  $RH$  стремится к насыщению вследствие понижения его температуры до точки росы  $T_d$  или обогащения водяным паром.

На рис. 1 представлена временная зависимость температуры воды  $T_w$  в нижнем бьефе в течение 2020 г.

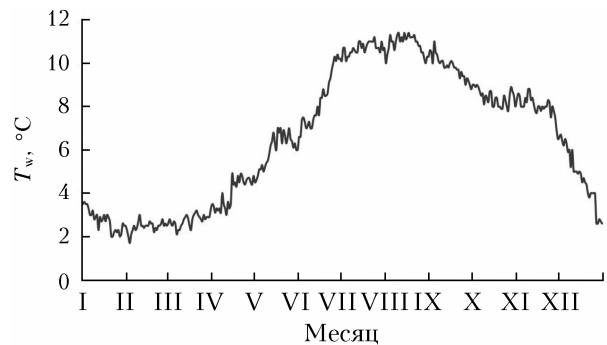


Рис. 1. Температура воды на водозаборе «Гремячий Лог» в 2020 г.

Количество туманов по месяцам представлено в таблице. В 2020 г. было зарегистрировано 45 туманов.

### Количество зарегистрированных туманов в 2020 г.

Месяц											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
4	10	2	–	–	–	3	2	11	1	7	5

Туманы, которые возникают в наших условиях, можно разделить на две категории: адвективные туманы охлаждения и адвективные туманы парения.

### 3.1. Адвективные туманы охлаждения

Адвективные туманы охлаждения (*advective cooling fogs*) возникают в теплое время года, когда температура атмосферы  $T_a > T_w$ . Теплый ненасыщенный воздух охлаждается при адвекции над холодной подстилающей водной поверхностью. При достижении температуры, равной точке росы  $T_d$ , относительная влажность воздуха  $RH$  стремится к 100% и часть паров переходит в туман.

$RH$  определяется как отношение фактического давления водяного пара  $e_a$  к равновесному давлению пара  $e_s$

$$RH = 100 \cdot \frac{e_a}{e_s} \quad (1)$$

Давление насыщенного пара  $e_s$  можно рассчитать по формуле Магнуса–Тетонса [16]:

$$e_s = b_0 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot T_a}{b + T_a}\right), \quad (2)$$

где скорректированные [17] коэффициенты  $b_0 = 6,1$  мбар;  $a = 17,6$ ;  $b = 243$  °С.

Точка росы определяется по формулам [17]:

$$T_d = \frac{b \cdot f(T_a, RH)}{a - f(T_a, RH)}, \quad (3)$$

$$f(T_a, RH) = \frac{a \cdot T_a}{b + T_a} + \ln\left(\frac{RH}{100}\right). \quad (4)$$

Первый туман охлаждения был зарегистрирован в полночь 31 июля и рассеялся после 12:00 1 августа (рис. 2).



Рис. 2. Туман охлаждения над р. Енисеем (правый берег, 1 августа 2020 г., 07:30, ширина реки – 600 м)

На рис. 3 представлены усредненные метеоданные, соответствующие этому времени: скорость ветра  $WS$ , относительная влажность воздуха  $RH$  и температура воздуха  $T_a$ .

Согласно этим данным 31 июля после 12:00 началось увеличение  $RH$  и уменьшение  $T_a$ , что привело к образованию тумана. В период существования тумана  $RH \approx 95\%$ , а  $T_a = 13 \div 14^\circ\text{C}$ . Для этих значений, согласно формуле (3),  $T_d = 12,2^\circ\text{C}$ . Для достижения точки росы над холодной поверхностью реки требуется понижение температуры воздуха на  $0,8^\circ\text{C}$ . После 12:00 1 августа началось уменьшение  $RH$  и увеличение  $T_a$  до  $14^\circ\text{C}$ , поэтому достижение точки росы  $T_d$  стало невозможным и образование тумана прекратилось. В период тумана дул слабый (до  $0,5\text{ м/с}$ ) юго-западный ветер. Однако скорость относительного движения воздуха и воды, вызванная течением реки, составляла  $1,5\text{ м/с}$ .

В период существования тумана  $T_w = 10,6^\circ\text{C}$ . Таким образом, для существования тумана необходимо, чтобы разность температур воздуха и воды была меньше:  $\Delta T = (T_a - T_w) = 3,4^\circ\text{C}$ . Анализ статистических данных, полученных нами, позволяет сделать вывод, что для формирования тумана необходимы следующие условия:  $RH > 80\%$ ,  $0 < \Delta T < 6^\circ\text{C}$  и  $WS < 0,5\text{ м/с}$ . Вне этих значений  $T_d$  недостижима. При  $\Delta T > 6^\circ\text{C}$  атмосферный воздух не успевает охладиться до точки росы, а при  $\Delta T = 0$  охлаждение невозможно.

### 3.2. Адвективные туманы парения

Туманы парения (*steam fogs*) формируются зимой, ранней весной и осенью. Образование таких туманов обусловлено испарением с «теплой» поверхности реки с последующим охлаждением поднимающихся паров в процессе турбулентного перемешивания с окружающим холодным воздухом. При этом начальное влагосодержание в атмосферном воздухе значительно меньше влагосодержания среды над поверхностью воды. Образование тумана происходит, когда температура среды перемешивания достигает точки росы.

Первый туман парения в 2020 г. сформировался в 15:00 11 января и рассеялся после 12:00 12 января (рис. 4). Во время существования тумана  $WS < 0,5\text{ м/с}$ ,  $T_w = 3^\circ\text{C}$  в 08:00 11 января. В начале формирования тумана  $T_a = -18,4^\circ\text{C}$ ,  $RH = 80\%$ ,  $\Delta T = T_w - T_a = 21,4^\circ\text{C}$ . В последующем  $T_a$  уменьшилась до  $-21,5^\circ\text{C}$ , затем увеличилась до  $-18^\circ\text{C}$  ко времени рассеяния тумана;  $RH$  в этот период сохранялась на уровне  $80\%$ .

Статистические данные по  $RH$  и  $\Delta T$  во время существования туманов парения в течение 2020 г. показывают, что туманы возникали при  $8 < \Delta T < 25^\circ\text{C}$ ,  $RH > 75\%$  и  $WS < 0,5\text{ м/с}$ .

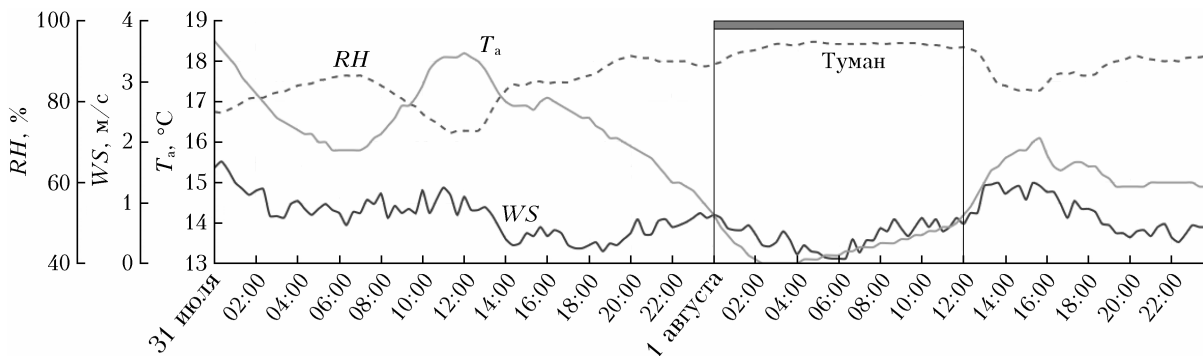


Рис. 3. Усредненные по постам наблюдений метеоданные за 31.07–1.08.2020 г.

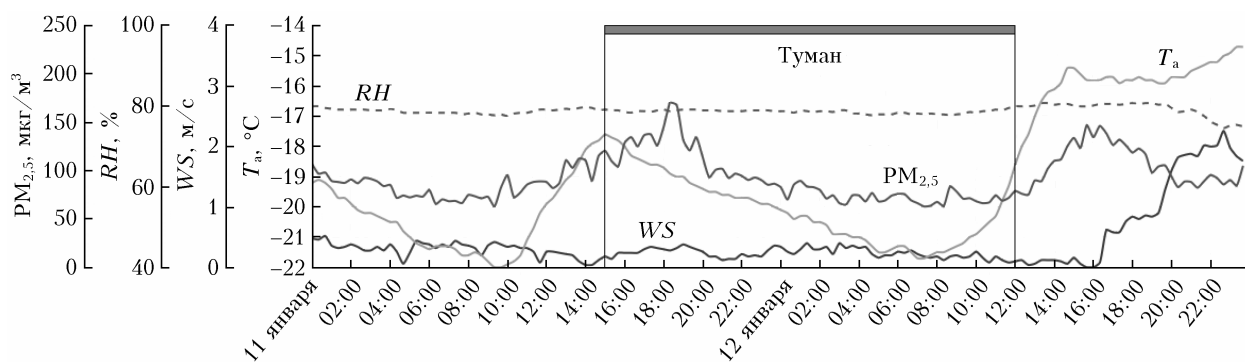


Рис. 4. Усредненные по постам наблюдений метеоданные за 11–12.01.2020 г.

### 3.3. Дистанционное зондирование туманов

Использование спутниковой информации для анализа туманов при всей своей привлекательности наталкивается на существенные технические проблемы. Туманы – это непостоянное явление, оно, как правило, возникает в определенные моменты времени (сезон года и время суток) и существует относительно недолго. Спутниковые данные имеют свои пространственно-временные особенности и ограничения по времени.

Пространственное разрешение доступных спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешения составляет не менее 30 м, периодичность съемки – один раз в несколько дней, при этом съемка выполняется около полудня. Другой значительной проблемой является облачность: не менее половины дней в году Красноярск прикрыт обла-

ками, из-за которых невозможно использовать спутниковые данные. Анализ архивов спутниковых данных Landsat-8 (пространственное разрешение данных видимого диапазона 15 м), Sentinel-2 (10 м), Planet Scope (3 м), Copernicus-V (2 м), на которых можно обнаружить туманы, показал, что за весь 2020 г. имеется всего лишь несколько сцен с изображением только туманов парения. На снимке Sentinel-2 за 11 января 2020 г. (рис. 5) туманы парения наблюдаются практически непрерывно вдоль Енисея на расстоянии ~200 км от плотины ГЭС и далее отдельными стратами на расстоянии до 300 км. Время съемки соответствует началу формирования тумана.

На фрагменте снимка Landsat-8 за 28 ноября 2020 г. (рис. 6), как и в предыдущем случае, видно, что туман в г. Красноярске неоднородный, имеет форму страт. Время съемки соответствует рас-сеянию тумана.

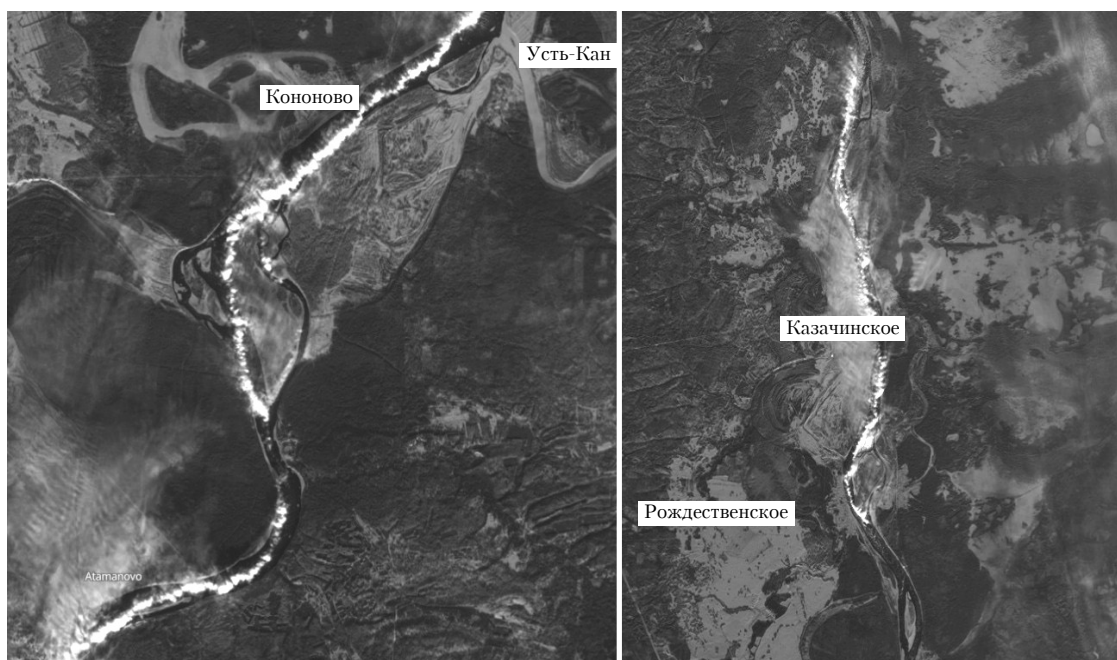


Рис. 5. Туманы парения на р. Енисее в районе деревни Кононово (140 км от плотины ГЭС) и села Казачинское (300 км) на спутниковом снимке Sentinel-2 (11 января 2020 г., 12:02)



Рис. 6. Фрагмент центральной части г. Красноярска на спутниковом снимке Landsat-8 (28 ноября 2020 г., 11:47). Пространственное разрешение спутниковых данных видимого спектрального диапазона – 30 м

## Заключение

Проведена регистрация туманов в течение 2020 г. в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на р. Енисее. Формирование туманов обусловлено аномальным гидротермическим режимом в нижнем бьефе ГЭС. Показано, что формируются два типа туманов: адвективные туманы охлаждения в летнее время и адвективные туманы парения зимой, ранней весной и осенью.

Туманы охлаждения возникают в результате понижения температуры нижнего влажного слоя атмосферного воздуха при условиях  $RH > 80\%$ ;  $0 < \Delta T < 6^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = T_a - T_w$ ;  $WS < 0,5$  м/с. Туманы парения формируются при охлаждении водяного пара над поверхностью воды при адвекции поверхности реки относительно холодного слоя атмосферного воздуха и реализуются при условиях  $RH > 75\%$ ;  $8 < \Delta T < 25^\circ\text{C}$ ;  $WS < 0,5$  м/с.

Исследование туманов парения с помощью методов дистанционного зондирования Земли по спутниковым снимкам позволяет определить их пространственное расположение вдоль и поперек реки, установить взаимосвязь с текущими метеоусловиями. По данным обработки архива полученных спутниковых снимков туманы формируются в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на расстояние вплоть до 300 км от плотины.

*N.Ya. Shaparev, A.V. Tokarev, O.E. Yakubailik. Formation of fogs downstream of the Krasnoyarsk hydropower plant on the Yenisei river.*

Generation of fogs downstream of the Krasnoyarsk hydropower plant on the Yenisei River during 2020 is studied. Meteorological conditions at the time of fog generation were recorded on the geoportal developed by the authors; water temperatures were taken at a gauging station; fogs were recorded with the help of video surveillance cameras. Data analysis showed generation of advective cooling fogs in summer and advective steam fogs in winter, early spring, and autumn. Cooling fogs are generated due to the cooling of the moist air as the lower atmosphere interacts with a colder moving water surface. Steam fogs result from the advective cooling of water vapor on the river surface by the colder adjacent atmosphere. The spatial distribution of steam fogs was derived from remote sensing data.

## Список литературы

1. WMO, Aerodrome Reports and Forecast: A User's Handbook to the Codes. Geneva, Switzerland, 2020. N 782. 86 p.
2. Duynkerke P.G. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations // Mon. Weather Rev. 1991. V. 119, N 2. P. 324–341.
3. Gultepe I., Tardif R., Michaelides S.C., Cermak J., Bott A., Bendix J., Müller M.D., Pagowski M., Hansen B., Ellrod G., Jacobs W., Toth G., Cober S.G. Fog research: A review of past achievements and future perspectives // Pure Appl. Geophys. 2007. V. 164, N 6–7. P. 1121–1159.
4. Mason J. The physics of radiation fog // J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II. 1982. V. 60, N 1. P. 486–499.
5. Bergot T., Guedalia D. Numerical forecasting of radiation fog. Part I: Numerical model and sensitivity tests // Mon. Weather Rev. 1994. V. 122, N 6. P. 1218–1230.
6. Holets S., Swanson R.N. High-inversion fog episodes in central California // J. Appl. Meteorol. 1981. V. 20, N 8. P. 890–899.
7. Ryznar E. Advection-radiation fog near Lake Michigan // Atmos. Environ. 1977. V. 11, N 5. P. 427–430.
8. Saunders P.M. Sea smoke and steam fog // Q. J. R. Meteorol. Soc. 1964. V. 90, N 384. P. 156–165.
9. Okland H., Gotaas Y. Modelling and prediction of steam fog // Environ. Sci. 1995. V. 68. P. 121–131.
10. Gultepe I., Isaac G.A., Williams A., Marcotte D., Strawbridge K.B. Turbulent heat fluxes over leads and polynyas, and their effects on arctic clouds during FIRE-ACE: Aircraft observations for April 1998 // Atmosphere–Ocean. 2003. V. 41, N 1. P. 15–34.
11. Гудошникова О.А., Матвеев Л.Т. Образование и развитие туманов с учетом синоптической обстановки // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 4. С. 303–307.
12. Зароченцев Г.А., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И., Игнатов Р.Ю., Юсупов Ю.И. Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 981–987.
13. Dingman S. Physical Hydrology. Illinois: Waveland Press, 2015. 643 p.
14. Shaparev N., Astafiev N. Water resources of the Krasnoyarsk Krai in sustainable water management indices // Int. J. Sustain. Dev. World Ecol. 2008. V. 15, N 6. P. 574–583.
15. Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A., Tokarev A.V. WEB geographic information system and the hardware and software ensuring rapid assessment of air pollution // Optoelectron. Instrum. Data Process. 2018. V. 54, N 3. P. 243–249.
16. Murray F.W. On the computation of saturation vapor pressure // J. Appl. Meteorol. 1967. V. 6, N 1. P. 203–204.
17. Lawrence M.G. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2005. V. 86, N 2. P. 225–234.