

<sup>1,\*</sup>Левченко Э. П., <sup>2</sup>Павленко А. Т., <sup>1</sup>Ножненко А. А.

<sup>1</sup>Донбасский государственный технический университет,

<sup>2</sup>Луганский государственный университет им. В. Даля

\*E-mail: levchenckoeduard@yandex.ru

## ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИИ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА В ПЕРИОД ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

*Работа посвящена анализу особенностей облакообразования и их роли в период глобального потепления климата. Рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на парниковый эффект, а также поведение и роль облачного покрова в климатическом режиме планеты.*

**Ключевые слова:** глобальное потепление климата, парниковый эффект, облачный покров, облака, температура, влажность, парниковые газы.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Впервые влияние глобального потепления вследствие избыточного накопления атмосферой Земли углекислого газа было озвучено еще в 1896 г. швейцарским химиком Сванте Аррениусом [1]. В своей статье «О влиянии углекислоты в воздухе на температуру земной поверхности» было приведено аналитическое обоснование поглощения инфракрасных волн углекислым газом, находящимся в атмосфере. При этом была учтена и роль водяного пара. Отмечалось, что накопление углекислого газа, образующегося при сжигании углеродного топлива, приводит к постепенному потеплению. А это интенсифицирует испарение влаги из водоемов, что усугубляет повышение общей температуры. Аррениусом также прогнозировалось таяние ледовых полей и связанное с этим снижение отражательной способности земной поверхности, как и увеличение испарительной способности влаги. Отмечалась роль облаков, как общего покрывала, отражающего солнечный свет и одновременно затеняющего Землю, и их распределение по высоте. Теоретически было обосновано, что повышение средней температуры на 5,5 °C произойдет при повышении концентрации углекислого газа в 2 раза. Аррениус считал это большим преимуществом ввиду создания более комфортных климатических условий на планете.

На современном этапе развития цивилизации одной из первостепенных проблем является глобальное потепление климата. Основной причиной этого считается избыточное накопление как углекислого газа в атмосфере, так и активное выделение метана. При этом влияние метана примерно в 17–20 раз превышает влияние самого углекислого газа.

Так как углекислый газ почти в 2 раза тяжелее воздуха, в конечном итоге это создаст парниковый эффект за счет своеобразного окутывания углекислым газом земной поверхности в нижней части приземной атмосферы.

Для борьбы с глобальным потеплением в соответствии с климатическим Парижским соглашением (2015 г.) средняя глобальная температура воздуха не должна подняться более чем на +2 °C по сравнению с доиндустриальным временем, при наиболее желательном ее приращении в +1,5 °C [2].

В последнее время выявлено влияние на процесс изменения климата и облачного покрова, который также создает эффект «одеяла». При этом, с одной стороны, облачный покров препятствует отдаче тепла с земной поверхности, а, с другой стороны, способствует отражению солнечного света в верхней части атмосферы.

**Постановка задачи.** Одним из факторов, оказывающих влияние на процесс глобального потепления климата, является

облачный покров, который может выступать как в роли одеяла, укутывающего Землю от космического холода, так и в роли отражателя тепловых волн.

В связи с этим, **целью** данной работы является анализ особенностей влияния облаков различных ярусов на возникновение парникового эффекта.

**Объектом исследования** является способность облачного покрова взаимодействовать с тепловыми излучениями Солнца и земной поверхности.

**Предмет исследования** — особенности изменения облачного покрова и его поведения при влиянии на процесс глобального потепления климата.

**Задача исследования** — анализ влияния облачного покрова и его изменения на климатические показатели окружающей среды.

**Методика исследования.** Аналитические методы анализа особенностей влияния эффекта облачности и его распределения на климатические характеристики земной поверхности.

**Изложение материала.** Принято считать, что современное климатическое состояние Земли характеризуется глобальным потеплением климата, где основную роль играют парниковые газы — метан и углекислый газ. Однако, согласно исследованиям [3], вклад основных составляющих в парниковый эффект распределяется следующим образом: решающая роль отводится атмосферному водяному пару, а затем углекислому газу (рис. 1).

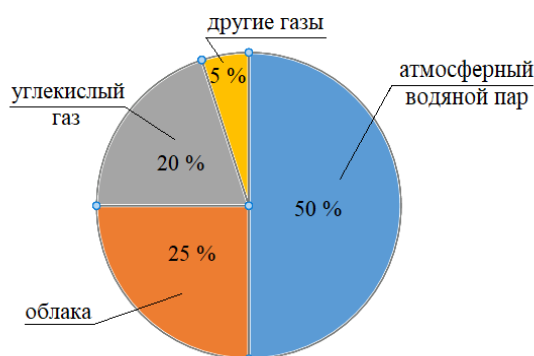
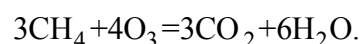


Рисунок 1 — Вклад основных источников в глобальное потепление климата

Действительно, близкое к экспоненциальной зависимости насыщение атмосферы углекислым газом скорее уже обуславливается не антропогенной деятельностью человека, связанной со сжиганием различного топлива, а существенной ролью метана. Например, ввиду интенсивного таяния вечной мерзлоты из-за прогрева почвы в северных районах освобождающийся метан вступает в химическую реакцию с озоном в верхних слоях атмосферы, превращаясь в водяные пары и тот же углекислый газ [4]:



Вследствие повышения температуры на основе положительной обратной связи увеличивается и концентрация водяного пара в атмосфере [3]. А возрастание средней температуры воздуха на земном шаре на 1 градус способствует увеличению насыщающей способности упругости водяного пара на 6,5 %.

В соответствии с данными спутникового мониторинга с использованием многоугольного радиоспектрометра MISR обнаружено, что с марта 2000 по февраль 2010 года высота облачного покрова стала ниже на 30–40 метров [5, 6], что составляет около 1 % от обычной высоты. Причем более высоко расположенные облака опустились значительно сильнее.

Объяснений причин этого пока нет. Возможно снижение облаков вызвано уменьшением плотности воздуха из-за его более интенсивного прогрева вблизи земной поверхности.

Известно, что ввиду интенсивного таяния льда на полюсах происходит перераспределение земной массы. Следовательно, величина момента инерции земного шара может изменяться. Кроме того, этому способствуют испарение и выпадение влаги, вулканическая деятельность и многое другое.

Для коррекции частоты вращения земли с 1970-х годов были введены дополнительные 37 секунд. Однако 29 июня 2022 года было зафиксировано, что её один оборот произошёл на 1,59 миллисекунды быстрее приня-

тых 24 часов [7]. Для компенсации этого в 2028 г. потребуется вычесть уже 1 секунду.

Кинетическая энергия вращающегося тела характеризуется уравнением [8, 9]

$$E_3 = \frac{\omega_3 \cdot I_3}{2}, \quad (1)$$

где  $\omega_3$  — угловая частота вращения Земли;  $I_3$  — момент инерции Земли.

Если упрощённо представить форму геоида Земли в виде шара, то его момент инерции

$$I_3 = \frac{2}{5} \cdot m_3 \cdot r_3^2, \quad (2)$$

где  $m_3$  — масса земного шара;  $r_3$  — средний радиус земного шара [10].

Если предположить, что энергия вращения практически не изменяется, подставив выражение (2) в (1), получаем

$$E_3 = \frac{\omega_3 \cdot I_3}{5} \cdot m_3 \cdot r_3^2 = \text{const}. \quad (3)$$

Отсюда

$$\omega = \frac{5 \cdot E_3}{I_3 \cdot m_3 \cdot r_3^2}. \quad (4)$$

Таким образом, при увеличении момента инерции Земли её угловая скорость уменьшается. При уменьшении момента инерции угловая скорость возрастает.

Ввиду сложных процессов, происходящих в атмо-, гидро-, лито-, крио- и других сферах Земли, а также в зависимости от материала, геометрической формы и расположения оси вращения её момент инерции снижается при расположении массы дальше от оси вращения. Если же масса перераспределяется на более дальнее расстояние от оси вращения, то момент инерции возрастает.

Естественно, изменение параметров климата сказывается на изменениях в облачном покрове земного шара, его массе и высоте распространения, что приводит и к изменению момента инерции Земли в целом.

На облака, как на тела, обладающие определённой массой, действует центробежная сила

$$F_y = m_o \cdot \omega_3^2 \cdot h_o, \quad (5)$$

где  $F_y$  — центробежная сила;  $m_o$  — масса объекта;  $h_o$  — высота расположения облаков.

При этом сила тяжести

$$F_m = m_o \cdot g^2, \quad (6)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

Следовательно, на высоте расположения облаков сила тяжести должна уравновешиваться центробежной силой ( $F_m = F_y$ ).

Тогда

$$m_o \cdot \omega_3^2 \cdot h_o = m_o \cdot g^2, \quad (7)$$

откуда можно определить высоту расположения облаков

$$h_o = \sqrt{\frac{g^2}{\omega_3^2}}. \quad (8)$$

Таким образом, определяющую роль в высотной фиксации облаков играет угловая скорость вращения Земли, а не их масса.

Угловая скорость вращения Земли составляет  $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{24 \cdot 3600} \approx 7,27 \cdot 10^{-5}$  рад/с.

Ускорение свободного падения не является постоянной величиной и изменяется в зависимости от географического положения в диапазоне от  $9,780 \text{ м/с}^2$  (в районе экватора) до  $9,82 \text{ м/с}^2$  (в районе полюсов). Средняя стандартная величина часто принимается равной  $9,80665 \text{ м/с}^2$ .

В таблице 1 представлены значения предполагаемой высоты расположения облаков, вычисленные по формуле (8). Анализ полученных данных показывает, что имеющееся приращение ускорения вращения Земли недостаточно для опускания облаков на 1 %. Чисто механистический подход не учитывает многих иных составляющих. Например, одной из причин опускания облачного покрова может выступать снижение плотности воздуха в результате повышения его среднегодовой температуры, обусловленного тем же эффектом глобального потепления климата на планете.

Известно [11, 12], что вторая половина XX века характеризовалась возрастанием общей облачности как на континентах с умеренными широтами, так и в Северном полушарии. С начала 90-х годов прошлого столетия увеличение облачного покрова наблюдалось только над океанической поверхностью, когда над территорией суши процесс облакообразования уменьшился [13].

Основным индикатором изменений климата является приповерхностная температура воздуха (рис. 2), поскольку на неё откликаются все параметры климатической системы. А так как от температуры воздуха напрямую зависит относительная влажность, то одним из основополагающих факторов является именно облачность.

С 1983 по 2008 гг. образование общей облачности привело к устойчивому отрицательному тренду (рис. 3) [14].

Яркой отличительной особенностью является близкая к зеркальной зависимость образования облаков нижнего яруса по сравнению с образованием облаков среднего и верхнего ярусов (рис. 3).

Согласно уравнению Клаузиуса — Клапейрона [10], описывающему процессы фазового перехода веществ, снижение температуры воздуха способствует сокращению испарительной способности вод и уменьшает атмосферную влажность:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}F = E - P, \quad (9)$$

где  $W$  — содержание водяного пара в атмосфере;  $F$  — вертикально интегрированный поток водяного пара;  $\text{div}F$  — разность между выносом и вносом атмосферной влаги на исследуемой территории;  $E-P$  — эффективное испарение.

Таблица 1

Расчётные значения высоты расположения облаков

|                                                |          |          |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|----------|----------|------|------|------|------|
| Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> |          | 9,78     | 9,79 | 9,8  | 9,81 | 9,82 |
| Высота, м, при длительности суток              | 24 ч     | 1147     | 1148 | 1149 | 1150 | 1151 |
|                                                | 24 ч+1 с | 1147     | 1148 | 1149 | 1150 | 1151 |
| Среднее процентное расхождение высот           |          | 0,0025 % |      |      |      |      |

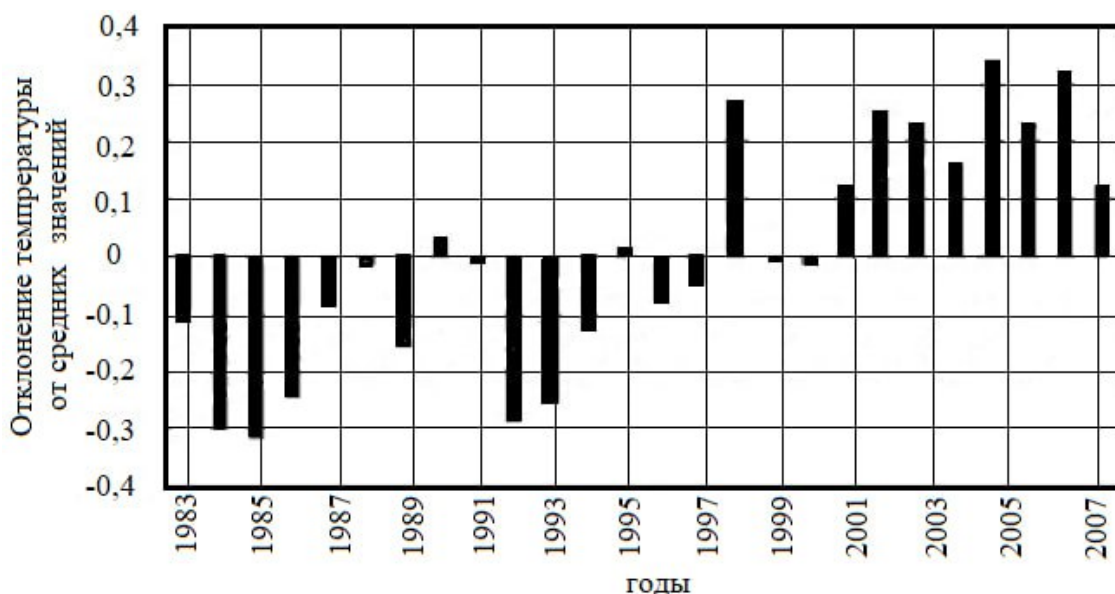


Рисунок 2 — Наблюдаемые изменения глобальной приповерхностной температуры воздуха за период 1983–2008 гг.

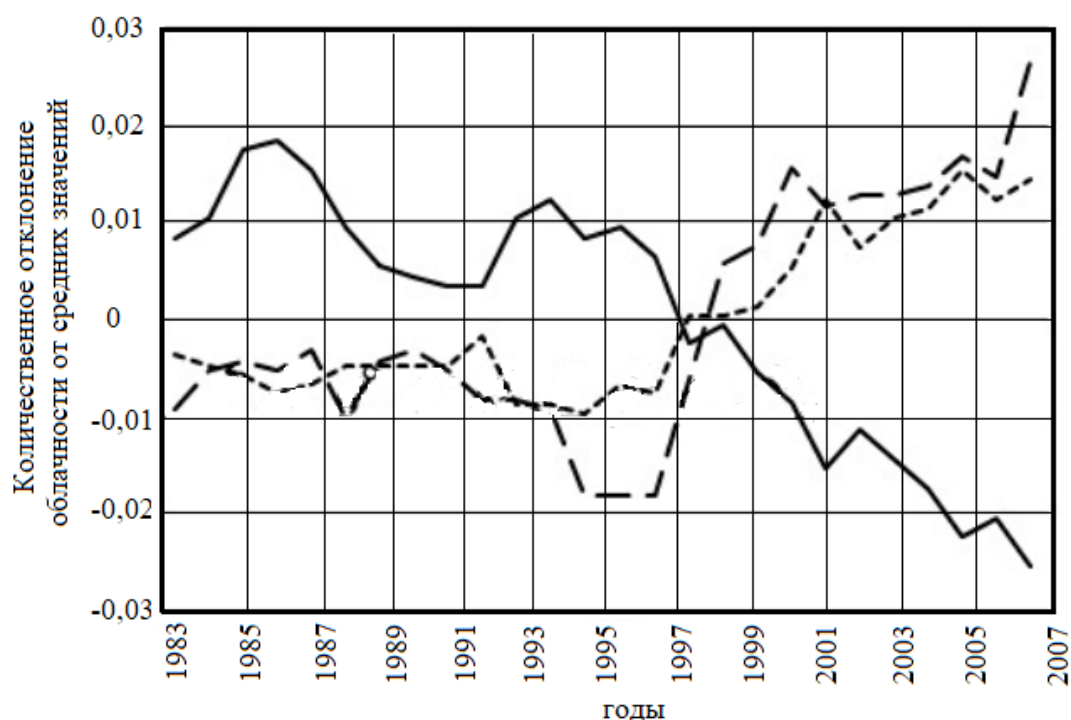


Рисунок 3 — Изменения количества облачности нижнего (сплошная линия), среднего (пунктирная линия) и верхнего (штриховая линия) ярусов

Атмосферный воздух с меньшим содержанием водяных паров оказывает отрицательное влияние на образование облаков, а следовательно, и суммарного облачного покрова.

Считается, что облака отражают 16,5 % солнечной радиации при альбедо (отражательной способности), находящемся в пределах 10–25 %, а 5 % солнечной радиации отражается земной поверхностью. Установлено, что существенные изменения земного климата связаны с увеличением альбедо и степени черноты. Величина общего альбедо составляет около 30 %. При полном отсутствии облаков общее альбедо сократилось бы до 15 %, а земная поверхность претерпела бы значительный нагрев, так как приращение тепловой энергии от Солнца составило бы 27 Вт/м<sup>2</sup> [15].

Увеличение температуры приводит к повышению количества водяного пара в атмосфере. В этом процессе немаловажную роль играют процессы таяния льдов и снежного покрова, приводящие к возрастанию площади открытых поверхностей. Поэтому утверждается, что криосфера по-

сле облачности занимает второе место в глобальном изменении климата [16].

Согласно исследованиям, выполненным в университете Лейпцига и китайскими учёными, уставлено, что в ночной период охлаждающая способность облаков является меньшей, чем днём, когда согревающая способность носит обратный характер. Следовательно, облачный покров днём способствует отражению солнечного света, а в ночной период — удержанию тепла. Днём наблюдается количественное уменьшение облаков при его сохранении в ночной период, что снижает коротковолновой эффект альбедо на протяжении дня. Ночью возрастает длинноволновой эффект, способствующий глобальному потеплению [17].

Известно, что из-за глобального изменения климата установлен подъем уровня мирового океана на 200 миллиметров. При прогнозировании повышения температуры на 1,5 °C подъем океанских вод составит 480 мм (относительная влажность увеличится на 10,5 %), а на 2 °C — 560 мм (от-

носительная влажность увеличится на 14 %). Вероятностное наступление засухи при увеличении температуры на  $1,5^{\circ}\text{C}$  возрастает в 2,4 раза при её длительности 2 месяца, когда с увеличением температуры на  $2^{\circ}\text{C}$  длительность засухи составит 4 месяца [18].

Прогнозирование с помощью климатического моделирования указывает на синхронную связь температуры и концентрации углерода (рис. 4).

Исключение потепления возможно путём ограничения эмиссии углерода (чёрная линия). Красная вертикальная пунктирная линия характеризует углеродный баланс, способствующий потеплению. Синяя линия указывает на нейтральный характер потепления.

Обычно облака, располагающиеся на большой высоте, оказывают преобладающее влияние на сохранение тепла на Земле: толщина (вертикальный размер) самого облака обеспечивает лучшую отражательную способность от земной поверхности (чем больше толщина облака, тем выше отражательная способность). Парниковый эффект хорошо создаётся высоко расположенными тонкими облаками, лучше пропускающими солнечный свет и препятствующими утечке инфракрасной части спектра (рис. 5).

За счёт низко расположенных толстых облаков, хорошо отражающих инфракрасное излучение, обеспечивается охлаждение земной поверхности. Благодаря этому создаётся зонтичный эффект, предотвращающий перегрев Земли.

Более вероятным считается увеличение эффекта глобального потепления при повышении температуры за счёт ожидания сокращения количества низких облаков в тропиках. А в связи с большим подъёмом высоких облаков при нагреве атмосферы их согревающее влияние может увеличиться [19].

Облака снабжают дождевой водой растительность и водоёмы, а в зимний период препятствуют отводу тепла в космос.

Современные исследования выявили ускоренное сокращение облачного покро-

ва, а следовательно, увеличение жаркого периода. Это связано со значительным уменьшением количества аэрозольных частиц, максимальная концентрация которых наблюдалась 20 лет назад. Это сказывается на сокращении биоразнообразия [20].

Согласно межгодовому ходу влагосодержания атмосферы и эффективному испарению, количество водяных паров в атмосфере возросло на 1,6 мм (рис. 6) [21].

Следовательно, в атмосфере из года в год снижается накопление водяного пара (рис. 6, линия 1), а влагосодержание атмосферы (рис. 6, линия 2) возрастает. Это является логичным, т. к. увеличивающаяся температура воздуха позволяет ему впитывать больше влаги.

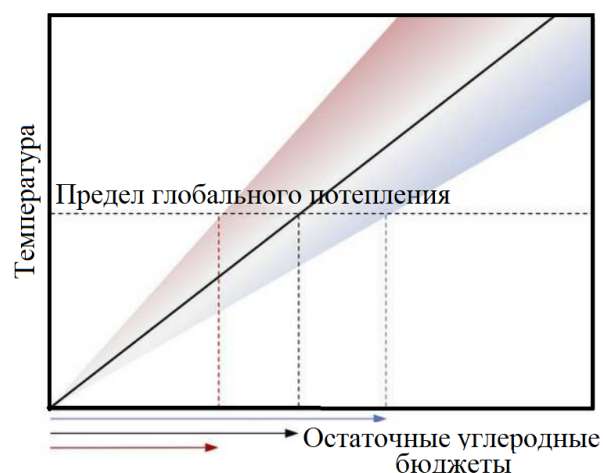


Рисунок 4 — Прогнозная зависимость концентрации углерода от температуры



Рисунок 5 — Роль облачного покрова



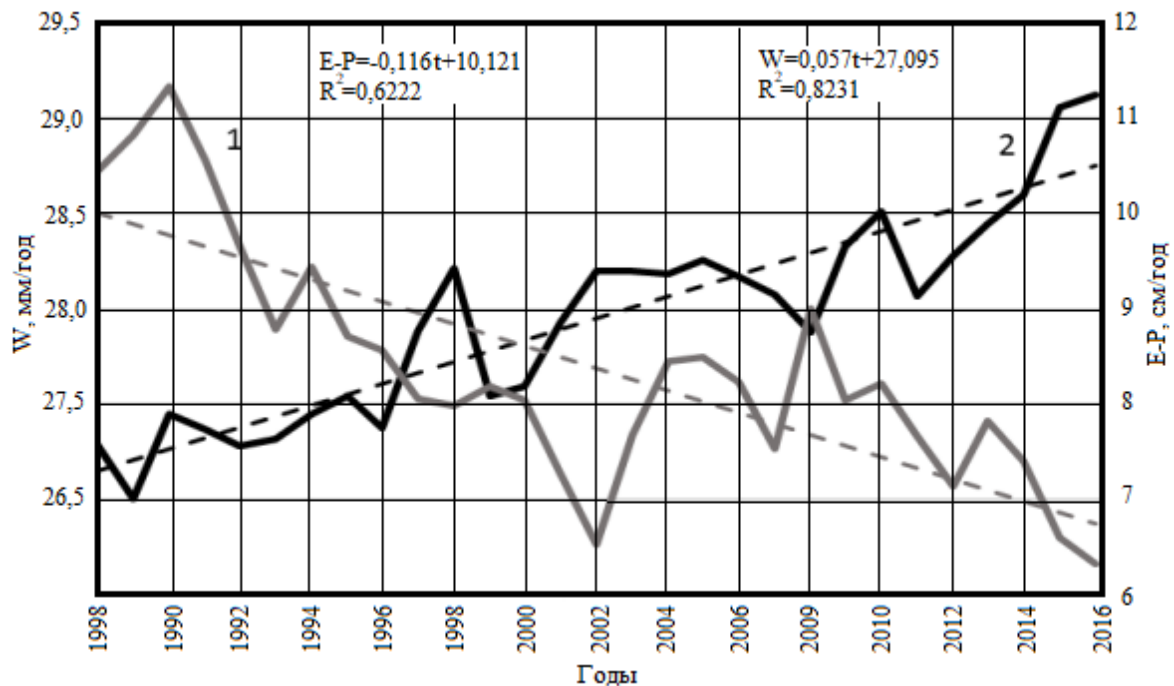


Рисунок 6 — Межгодовой ход эффективного испарения и влагосодержания атмосферы над поверхностью Мирового океана

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, основное влияние на парниковый эффект оказывают водяной пар (50 %) и облачный покров (25 %). Доля  $\text{CO}_2$  и других газов составляет лишь 25 %. Процесс оседания облаков ниже их обычной границы имеет сложный характер, который не всегда полностью подчиняется законам классической механики. Природа этого процесса пока малоизучена. Возможно, здесь существенное влияние оказывают вертикальные ско-

ростные потоки воздуха и снижение его плотности в результате нагрева. Повышенная средняя температура воздуха приводит к увеличению его гигроскопичности. Для более точного понимания процессов изменения в облачном покрове необходимы дальнейшие исследование и анализ недостающих факторов, что может дать уточнённую картину причинно-следственных связей влияния парниковых газов и влагосодержания атмосферы на глобальное изменение климата.

#### Список источников

1. Глобальное потепление: взгляд из позапрошлого века // Наука и жизнь. 2018. № 4. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/33496/> (дата обращения: 04.12.2024).
2. Специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата «Глобальное потепление на 1.5°C» / А. А. Гладильщикова, Т. М. Дмитриева, С. М. Семенов // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 4. С. 5–18.
3. Attribution of the present-day total greenhouse effect / G. A. Schmidt, R. A. Ruedy, R. L. Miller, A. A. Lacis // J. Geoph. Res. 2010. Vol. 115. No. D20. P. 2156–2202.
4. Левченко Э. П. Перспективы управления агрегатным состоянием водных ресурсов на основе глобального потепления климата // Экологический вестник Донбасса. 2021. № 2. С. 28–37.
5. Малинин В. Н., Гордеева С. М., Наумов Л. М. Парниковый эффект и климат // Гидрометеорология и экология: научные достижения и перспективы развития : труды II всероссийской конференции. СПб. : Химиздат, 2018. С. 419–421. EDN YYMOUX

6. Облака нависают над планетой все ниже [Электронный ресурс] // pravda.ru : [сайт]. [2024]. URL: <https://www.pravda.ru/amp/news/science/1109474-clouds/> (дата обращения: 04.12.2024).
7. Хромцова А. Скорость вращения Земли увеличивается. О чём говорит эта аномалия и насколько она опасна [Электронный ресурс] // Вечерняя Москва : [сайт]. [2024]. URL: <https://vm.ru/society/1037595-skorost-vrasheniya-zemli-uvelichivaetsya-o-chem-govorit-eta-anomaliya-i-naskolko-ona-opasna> (дата обращения: 04.12.2024).
8. Левченко Э. П., Левченко О. А. Основные положения и рекомендации по изучению прикладной механики и основ конструирования (теории механизмов и машин и деталей машин) : учебное пособие. Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. 169 с.
9. Левченко Э. П., Левченко О. А., Павленко А. Т. Прикладная механика. Лабораторно-практические работы : учебное пособие. Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. 152 с.
10. Левченко Э. П., Давиденко В. А., Ноженко А. А. Физика Земли. Лабораторно-практические работы : учебное пособие. Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. 208 с.
11. Recent trends in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies / A. Dai [et al.] // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2006. Vol. 87. P. 597–606.
12. Henderson-Sellers A. Continental cloudiness changes this century // GeoJournal. 1992. Vol. 27. P. 255–262.
13. Переведенцев Ю. П. Теория климата. Казань : Казанск. ун-т, 2009. 504 с.
14. Гусакова М. А. Влияние облачности на кратковременные климатические изменения // Учёные записки. 2013. № 29. С. 95–99.
15. Покровский О. М. Изменения облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исследование Земли из космоса. 2019. № 1. С. 3–13.
16. Абдусаматов Х. И. Лаповок Е. В., Ханков С. И. Влияние криосферы и площади облачного покрова Земли на изменение её энергетического баланса и глобального климата // Вестник МАХ. 2015. № 1. С. 61–64.
17. Китова Т. Найдена не очевидная причина нагрева планеты: структура облаков усугубляет изменение климата [Электронный ресурс] // Фокус : [сайт]. [2024]. URL: <https://focus.ua/technologies/653514-naydena-ne-ochividnaya-prichina-nagreva-planety-struktura-oblakov-usugublyaet-izmenenie-klimata> (дата обращения: 04.12.2024).
18. Рассел Р., Позднякова Н. На 1,5 градуса выше. Как глобальное потепление меняет жизнь [Электронный ресурс] // Deutsche Welle : [сайт]. [2024]. URL: <https://www.dw.com/ru/na-15-gradusa-vyshe-kak-globalnoe-poteplenie-menjaet-nashu-zhizn/a-59573908> (дата обращения: 04.12.2024).
19. Почему облака — недостающий элемент в пазле изменении климата жизнь [Электронный ресурс] // Климатический центр Росгидромета: [сайт]. [2024]. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/novosti/novosti-partnerov/924-pochemu-oblaka-nedostayushchij-element-v-pazle-izmenenii-klimata> (дата обращения: 04.12.2024).
20. Северное полушарие теряет облака. Последствия могут быть плачевными [Электронный ресурс] // Grani — источник проверенных знаний : [сайт]. [2024]. URL: <https://www.grani.lv/society/145082-severnoe-polusharie-teryaet-oblaka-posledstviya-mogut-byt-plachevnymi.html> (дата обращения: 04.12.2024).
21. К оценке трендов в компонентах влагообмена океана с атмосферой / В. Н. Малинин [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. № 11 (4). С. 28–33.

© Левченко Э. П., Ноженко А. А.

© Павленко А. Т.

**Рекомендована к печати к.х.н., зав. КМНИЛ НЦМОС ДонГТУ Смирновой И. В., д.т.н., проф. каф. техносферной безопасности ЛНУ им. В. Даля Филатьевым М. В.**

Статья поступила в редакцию 07.04.2025.



#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Левченко Эдуард Петрович**, канд. техн. наук, доцент каф. экологии и безопасности жизнедеятельности  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия,  
e-mail: levchenckoeduard@yandex.ru

**Павленко Александр Тимофеевич**, канд. техн. наук, доцент, зам. директора института гражданской защиты  
Луганский государственный университет им. В. Даля,  
г. Луганск, Россия

**Ноженко Алексей Алексеевич**, старший преподаватель каф. экологии и безопасности жизнедеятельности  
Донбасский государственный технический университет,  
г. Алчевск, Россия

**Levchenko E. P.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: levchenckoeduard@yandex.ru), **Pavlenko A. T.** (Lugansk State University named after V. Dahl, Lugansk, Russia), **Nozhenko A. A.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia)  
**PECULIARITIES OF CLOUDINESS VARIATIONS IN THE PERIOD OF GLOBAL CLIMATE WARMING**

*The work is devoted to analyzing the peculiarities of clouds formation and their role in the period of global warming. The main factors influencing the greenhouse effect are under consideration, as well as the behavior and role of cloudiness in the planet's climate regime.*

**Key words:** global warming, greenhouse effect, cloudiness, clouds, temperature, humidity, greenhouse gases.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Levchenko Eduard Petrovich**, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Ecology and Life Safety  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Russia,  
e-mail: levchenckoeduard@yandex.ru

**Pavlenko Alexander Timofeyevich**, PhD in Engineering, Assistant Professor, Deputy Director of the Institute of Civil Defense  
Lugansk State University named after V. Dahl,  
Lugansk, Russia

**Nozhenko Alexey Alekseyevich**, Senior Lecturer of the Department of Ecology and Life Safety  
Donbass State Technical University,  
Alchevsk, Russia