

Вклад углекислого газа и воды в парниковый эффект

© 2021. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., н. с., В. Н. Пугач¹, к. э. н., ректор,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Контроль эмиссии парниковых газов (ПГ) входит в число важнейших проблем, решаемых человечеством на современном этапе экономического развития. Основной вклад в парниковый эффект (ПЭ) вносят вода H₂O в виде пара и аэрозоля (более 70%) и диоксид углерода CO₂ (9–26%). Содержание H₂O в воздухе в основном зависит от температуры и состояния испаряющей поверхности. В связи с тем, что вклад антропогенных факторов в содержание H₂O в атмосфере практически не поддается учёту и контролю, моделирование динамики климатических изменений базируется преимущественно на данных о содержании в воздухе CO₂. Анализ публикаций по проблеме глобального потепления даёт повод задуматься о том, насколько надёжна естественно-научная база, которая используется для планирования действий человечества по регулированию климата. Недооценка вклада H₂O в парниковый эффект и концентрирование внимания исключительно на контроле выбросов других ПГ может привести к серьёзным ошибкам в выборе стратегии действий по смягчению последствий изменения климата Земли. Для решения проблемы необходимы широкомасштабные и достаточно продолжительные научные исследования, которые могут быть проведены в рамках комплексного экологического мониторинга. Выполнение соответствующих исследований имеет принципиальное значение для Российской Федерации, поскольку Россия относится к числу крупнейших эмитентов парниковых газов.

Ключевые слова: климат, парниковые газы, парниковый эффект, углеродный след, декарбонизация.

Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect

© 2021. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760, G. Ya. Kantor^{1,2} ORCID: 0000-0002-6462-6702,
V. N. Pugach¹ ORCID: 0000-0003-1220-4062, T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047,
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Control of greenhouse gas (GHG) emissions is one of the most important environmental problems to be solved by humanity at the present stage of economic development. The main contribution to the greenhouse effect (GHE) is made by water H₂O in the form of vapor and aerosol (over 70%) and carbon dioxide CO₂ (9–26%). The content of H₂O in air mainly depends on the temperature and condition of the evaporating surface. Due to the fact that the contribution of anthropogenic factors to the content of H₂O in the atmosphere is practically impossible to take into account and control, the modeling of the dynamics of climatic changes is based mainly on data on the content of CO₂ in the air. The analysis of publications on the problem of global warming gives reason to think about how reliable the natural science base is, which is used to plan the actions of mankind to regulate the climate. Underestimating the contribution of H₂O into GHE and focusing solely on the control of emissions of other GHGs can lead to serious mistakes in choosing a strategy for mitigating the effects of Earth's climate change. To solve the problem, large-scale and sufficiently long-term scientific research is required, which can be carried out within the framework of integrated environmental monitoring. The implementation of relevant studies is of fundamental importance for the Russian Federation, since Russia is one of the largest emitters of GHG.

Keywords: climate, greenhouse gases, greenhouse effect, carbon footprint, decarbonization.

Одной из наиболее актуальных проблем современной экологии является проблема так называемого «углеродного (карбонового) следа» (УС). Согласно распространённому определению, УС представляет собой меру «исключительного суммарного объёма выбросов диоксида углерода (CO_2), непосредственной или косвенной причиной которого является определённая деятельность или который аккумулируется на протяжении всего жизненного цикла продукта» [1]. Более детализированное определение этого понятия приводится в Федеральном законе от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»: «углеродный след – общий объём выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, образующихся в ходе производства продукции либо в ходе оказания услуг, который включает в себя прямые выбросы парниковых газов (образуемые в результате осуществления хозяйственной и иной деятельности), косвенные выбросы парниковых газов (связанные с потреблением электрической, тепловой энергии, иных ресурсов, используемых для обеспечения хозяйственной и иной деятельности и полученных от внешних объектов), поглощения парниковых газов в результате осуществления хозяйственной и иной деятельности, с учётом углеродных единиц, в отношении которых произведён зачёт». Очевидно, что между этими двумя определениями есть принципиальное различие. Согласно первому, единственным способом сокращения УС является снижение (в пределе – полное прекращение) выбросов CO_2 в атмосферу. Второе определение допускает возможность уменьшения УС за счёт компенсирующих мероприятий без сокращения выбросов CO_2 , что предоставляет большие возможности для экономической деятельности.

Несмотря на то, что общепринятого научного определения термину «углеродный след» до настоящего времени не выработано [2, 3] и непротиворечивых методик его измерения не создано, проблема УС вышла за рамки традиционной экологии и приобрела статус инструмента, позволяющего управлять тенденциями развития региональной и мировой экономики, оказывать существенное воздействие на глобальные политические процессы [4–6]. Поскольку с выбросами парниковых газов (ПГ) связывают неблагоприятные климатические изменения, наблюдаемые на нашей планете в последнее время, сокращение УС объявлено важнейшей задачей, которую необходимо решить человечеству на настоя-

щем этапе цивилизационного развития [7]. В соответствии с этим, ведущим трендом современной экономики становится установление сроков достижения углеродной нейтральности – нулевого баланса между количеством выбрасываемых и поглощаемых в результате углерод-отрицательных проектов ПГ. Швеция объявила о достижении соответствующей цели в 2045 г., Великобритания – в 2050 г., Китай – в 2060 г. [8], Россия – в 2060 г. В битву за нулевой углеродный баланс включаются не только страны, отрасли промышленности и предприятия, но и равнодушные граждане [9, 10]. К сожалению, идеология разворачивающейся борьбы вырабатывается главным образом в рамках экономики и политики, которые стоят на страже интересов отдельных государств или крупных корпораций. Наука пока не может предоставить однозначных доказательств в пользу того, что именно рост концентрации CO_2 в атмосфере является основной причиной климатических изменений [11].

Цель настоящей работы состоит в анализе различных подходов к оценке вклада CO_2 и H_2O в баланс между поглощаемой и излучаемой солнечной энергией.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования настоящей работы являлись парниковые свойства диоксида углерода и воды, как компонентов атмосферы. Для достижения поставленной цели использовали обзорно-аналитический и расчётный методы. Подбор информационных материалов осуществляли по ключевым словам в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics) и eLIBRARY.RU (Научная электронная библиотека). Поиск источников осуществляли в поисковых системах Яндекс и Google. Обработку информации проводили методами апперцепирования и аспектного анализа с использованием элементов аксиоматического и дескриптивного методов. Содержание основных терминов (углеродный след, парниковые газы, углеродный сток, эмиссия, выбросы и поглощение парниковых газов) определено в соответствии с Федеральным законом от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов».

Эволюция состава атмосферы и парниковый эффект

Углекислый газ является важнейшим звеном глобальной цепи преобразования

солнечной энергии в энергию химической связи фотоавтотрофными организмами (ФАО). За счёт энергии солнца ФАО связывают CO_2 в различные формы органических соединений и выделяют в атмосферу O_2 . Органические соединения разрушаются (окисляются) гетеротрофами, при этом O_2 поглощается, а CO_2 вновь поступает в атмосферный воздух. В благоприятных для ФАО условиях, интенсивность фотосинтеза может превысить интенсивность процессов окислительной деструкции органических соединений, в результате часть поглощённого из атмосферы CO_2 остаётся в связанной форме, что приводит к снижению концентрации этого газа в атмосферном воздухе и параллельному накоплению O_2 . Связанные формы углерода депонируются в недрах Земли в форме таких полезных ископаемых, как каменный уголь, горючие сланцы, торф, возможно углеводороды. Глобальный вклад в связывание углерода вносят и некоторые гетеротрофы, включающие малорастворимые карбонаты в состав своего скелета (коралловые полипы, раковинные моллюски, мшанки и др.). Благодаря жизнедеятельности соответствующих организмов на Земле сформировались огромные залежи биогенных карбонатных пород. В отличие от растений, животные связывают углерод в стабильную (неокисляемую гетеротрофами) неорганическую форму (преимущественно карбонат кальция), позволяющую переводить CO_2 из малого биологического в большой геологический круговорот. Запасы органических и неорганических С-содержащих полезных ископаемых формировались на протяжении сотен миллионов лет. Всё это время CO_2 извлекался из атмосферного воздуха. Ситуация кардинально изменилась в последние 150–200 лет, когда депонированные ресурсы восстановленных форм углерода (углеводороды, уголь) стали важнейшим фактором экономического развития человечества. За счёт сжигания С-содержащих полезных ископаемых скорость поступления CO_2 в атмосферу превысила скорость связывания этого вещества в биосфере. В результате вектор эволюции состава атмосферы изменился.

Согласно современным представлениям, повышение содержания CO_2 в атмосфере стало основной причиной глобального потепления и связанных с потеплением изменений климата. Потепление обусловлено «парниковым эффектом» (ПЭ), суть которого состоит в том, что тепловое инфракрасное излучение поверхности Земли, нагретой солнечными лучами видимой части спектра, поглощается пар-

никовыми газами атмосферы, что приводит к дополнительному нагреву нижних слоёв атмосферы и земной поверхности по сравнению с так называемой эффективной температурой планеты Земля, то есть температурой, рассчитанной исходя из мощности излучения, рассеиваемого планетой в космическое пространство. По общепринятым данным, эффективная температура Земли составляет -18°C , а средняя приземная температура воздуха $+15^\circ\text{C}$. Таким образом, величина ПЭ находится на уровне 33°C [12], что обеспечивает сложившиеся к настоящему времени климатические условия существования биосферы.

Задерживать тепловое излучение способен не только CO_2 , но и H_2O , CH_4 , O_3 , N_2O , гидрохлорфторуглероды (ГХФУ), гидрофторуглероды (ГФУ), гексафторид серы (SF_6), трифторид азота (NF_3). Все эти соединения объединены в группу ПГ, чем выше их содержание в атмосфере, тем меньше остывает поверхность Земли. Следует отметить, что доля ПГ в объёме атмосферного воздуха весьма мала. Основными компонентами земной атмосферы являются азот N_2 (около 78%об.), кислород O_2 (около 21%об.), аргон Ar (около 0,9%об.). На остальные газы (за исключением водяных паров) в сумме приходится около 0,1%об., однако газы этой группы оказывают определяющее влияние на эмиссию инфракрасного (теплого) излучения с поверхности планеты.

Углекислый газ и парниковый эффект

Научный интерес к CO_2 как ПГ был заложен в основополагающей статье С. Аррениуса «О влиянии углекислоты в воздухе на температуру земли» [13]. Основным выводом Аррениуса о логарифмической зависимости роста температуры от концентрации углекислого газа был подтверждён современными исследованиями с использованием численного компьютерного моделирования [14]. В подавляющем большинстве современных работ приводятся доказательства положительной корреляции между приземной температурой и содержанием CO_2 в воздухе, при этом вклад CO_2 в ПЭ оценивается разными авторами в пределах 9–26% от суммарной величины [15, 16]. Некоторые исследователи считают, что повышение температуры Земли вследствие ПЭ, обусловленного CO_2 , прекратится после достижения некоторого определённого уровня содержания этого газа в атмосфере [17]. Есть также теоретические модели, обосновывающие снижение приземной температуры при увели-

чении содержания CO_2 в азотно-кислородной атмосфере [18]. Такой разброс оценок сам по себе говорит об отсутствии надёжных методов расчёта величины ПЭ. Дискуссионным остаётся и вопрос о том, в какой степени изменения климата обусловлены антропогенным воздействием на атмосферу, а не другими факторами.

Вклад воды в парниковый эффект

Наибольший вклад в ПЭ вносит вода, которая находится в атмосфере в газообразном состоянии (пар) или в виде аэрозоля (туман, облака) [19, 20]. Необходимо отметить, что среди ПГ вода находится на особом месте. Объёмная доля паров H_2O в атмосферном воздухе в зависимости от температуры варьирует в широких пределах (от 0,02 до 5%), кроме того имеющиеся в арсенале науки данные не позволяют количественно оценить влияние антропогенного фактора на динамику содержания этого вещества в атмосфере. Картина осложняется тем, что H_2O в воздушном бассейне может находиться в газообразном, жидком или твёрдом состоянии. Для разных агрегатных состояний характерна разная поглощающая и отражающая способность. Соответствующие обстоятельства существенно затрудняют математические расчёты вклада антропогенной воды в величину ПЭ. В отличие от H_2O , содержание CO_2 в атмосфере достаточно стабильно, кроме того в распоряжении учёных имеются данные, позволяющие проследить динамику содержания CO_2 в воздухе на протяжении нескольких десятков лет и установить определённые корреляционные связи между интенсивностью хозяйственной деятельности и накоплением этого ПГ в атмосфере. В связи с этим, несмотря на значительный вклад H_2O в ПЭ, вектор исследований направлен на изучение и оценку парниковых свойств CO_2 . Воду, как основной ПГ планеты, Рамочная конвенция об изменении климата ООН напрямую не учитывает. Вместе с тем в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) указывается, что повышение температуры на 1 °C приводит к увеличению содержания H_2O в атмосфере на 7%. Тревогу вызывает и то, что рост концентрации водяного пара с ростом температуры обычно рассматривается как вторичный эффект, то есть как следствие ПЭ, а не его причина. Вопрос о том, насколько правомерен такой концептуальный подход, остаётся дискуссионным.

Анализ складывающейся ситуации даёт повод усомниться в надёжности естественно-научной базы, которая используется для планирования действий человечества по регулированию климата. Недооценка вклада H_2O в ПЭ может привести к серьёзным экологическим проблемам. В настоящее время большие надежды в плане поглощения CO_2 возлагаются на зелёные насаждения и лесные массивы. На территории России сосредоточено до 20% лесного покрова планеты. Вместе с тем, увеличение площади лесов неизбежно приведёт к повышению влажности воздуха и, как следствие, усилению ПЭ. Эта сторона проблемы воздействия на климат пока не находит достаточного отражения в научных публикациях. Кроме повышения влажности, увеличение площади лесных массивов повышает риск возникновения лесных пожаров, в результате которых в атмосферу выбрасываются миллионы тонн ПГ. Только в РФ в период с 2008 по 2021 гг. площадь лесных пожаров увеличилась в 7 раз. Леса горят не только в РФ, но и на территории Европы, Америки, Австралии, Азии. Следствием лесных пожаров является не только выброс CO_2 , но и загрязнение воздуха сажей. Оседание сажи на снежном покрове уменьшает его отражающую способность и способствует таянию льдов. Вклад лесных пожаров в размеры УС ещё предстоит оценить. По мнению экспертов, леса РФ в принципе могут стать «фабриками по депонированию углерода», но только при условии соответствующего обустройства огромных лесных территорий, включающего профилактику пожаров, обустройство защитных полос и т. д. [21]. Все эти работы требуют огромных материальных ресурсов. Соответствующие затраты, с точки зрения сохранения среды обитания и имиджа России, как экологически ответственного государства, вполне обоснованы, однако в экономическом плане могут оказаться чрезмерными. Безусловно, лес аккумулирует значительное количество CO_2 , однако хозяйственное использование древесины приводит к практически полному возврату этого газа в круговорот. По имеющимся оценкам только 0,8–1,0% связанного растениями углерода консервируется в большом геологическом круговороте [22]. Насколько в таком случае целесообразно ориентироваться на лес как фактор стока CO_2 ?

В последнее время появились публикации, в которых обосновываются перспективы широкомасштабного использования генномодифицированных растений (ГМР) для соз-

дания так называемых «управляемых лесов» [23]. Продуктивность и адаптационный потенциал ГМР значительно выше, чем у обычных растений. Исходя из перспектив обеспечения эффективного стока CO₂, использование ГМР представляет серьёзный коммерческий интерес. Однако, какое влияние на естественные экосистемы будут оказывать «управляемые леса» из ГМР? Этот вопрос также остаётся без ответа. Ещё больше опасений вызывают предлагаемые технологии депонирования CO₂ в недрах земли или глубинах океана [24]. Для получения ответов на поставленные вопросы необходимы широкомасштабные и достаточно продолжительные научные исследования, которые могут быть проведены в рамках комплексного экологического мониторинга. Проведение соответствующих исследований имеет принципиальное значение для РФ, поскольку, согласно Государственному докладу «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году», Россия относится к числу крупнейших эмитентов парниковых газов. Полученные в ходе экологического мониторинга данные могут создать надёжную доказательную базу для верификации, оптимизации и признания на международном уровне используемых в РФ методик оценки поглощающей способности лесов и других естественных и искусственных экосистем.

Заключение

Диапазон оценок результатов глобального потепления чрезвычайно широк – от полного отрицания каких-либо негативных последствий (и даже предсказания положительных эффектов от повышения урожайности сельхозкультур) до прогноза глобальных катастроф вследствие повышения уровня мирового океана, увеличения частоты экстремальных погодных явлений, оттаивания вечной мерзлоты, опустынивания и т. д. Сам факт наличия такого разброса мнений говорит о том, что фундаментальная проблема климатических изменений далека от окончательного общепринятого решения и требует приложения значительных усилий мирового научного сообщества для достижения понимания объективных причин, тенденций и возможных последствий наблюдаемой климатической динамики. Во всяком случае, принятие глобальных экономических и политических решений на базе неподтверждённых гипотез было бы по меньшей мере преждевременно.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме: «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Allwood J.M., Bosetti V., Dubash N.K., Gomez-Echeverri L., von Stechow C. Glossary // *Climate Change, 2014: Mitigating Impacts on Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. O. Edenhofer, R. Peachs-Madruga, J. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seibot, A. Adler, I. Baum, Sh Brunner, P. Eikemeyer, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlemer, K. von Stehof, T. Zwickel, J.K. Minx. Cambridge, NY: Cambridge University Press, 2014. P. 1251–1274 (in Russian).*
2. Durojaye O., Laseinde T., Oluwafemi I. A Descriptive review of carbon footprint // *Human Systems Engineering and Design II. 2020. P. 960–968. doi: 10.1007/978-3-030-27928-8_144*
3. Wiedmann T., Minx J. A definition of 'carbon footprint' // *Ecological Economics Research Trends / Ed. C.C. Pertsova. Chapter 1. Hauppauge NY: Nova Science Publishers, 2008. [Internet resource] https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999 (Accessed: 21.09.2021).*
4. Lukashenko I.V. Justification of the nature of carbon instruments based on market practice data // *Uchenye zapiski OGU. Seriya: Gumanitarnyye i Sotsialnyye nauki. 2015. No. 2. P. 45–52 (in Russian).*
5. Kharitonova N.A., Kharitonova E.N., Pulyaeva V.N. Russia's carbon footprint: realities and prospects for economic development // *Ekonomika v promyshlennosti. 2021. No. 4 (1). P. 50–62 (in Russian). doi: 10.17073/2072-1633-2021-1-50-62*
6. Dietz T., Frank K.A., Whitley C.T., Kelly J., Kelly R. Political influences on greenhouse gas emissions from US states // *PNAS. 2015. V. 112. No. 27. P. 8254–8259. doi: 10.1073/pnas.1417806112*
7. Makarov I.A., Stepanov I.A. Paris agreement on climate: Impact on world energy and challenges for Russia // *Aktualnyye problemy Evropy. 2018. No. 1. P. 77–97 (in Russian).*
8. Kashirova A.A. Corporate strategies for carbon neutrality. An overview of the climate commitments of global companies. Department of Multilateral Economic Cooperation of the Ministry of Economic Development of Russia [Internet resource] <https://www.economy.gov.ru/material/file/f55d57f8dcb8ec195b1575e857610dc/03062021.pdf> (Accessed: 20.10.2021) (in Russian).
9. Umnov V.A., Korobova O.S., Skryabina A.A. Carbon footprint as an indicator of the impact of the economy on the climate system // *Vestnik RGGU. Seriya "Ekonomika. Upravleniye. Pravo". 2020. No. 2. P. 85–93 (in Russian).*

10. Polyakov R.A. The practice of calculating the carbon footprint during events // *Simvol nauki*. 2016. No. 9–2. P. 190–192 (in Russian).
11. Stallinga P. Comprehensive analytical study of the greenhouse effect of the atmosphere // *Atmospheric and Climate Sciences*. 2020. V. 10. P. 40–48.
12. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds. R.K. Pachauri, A. Reisinger. IPCC, Geneva, Switzerland: Core Writing Team, 2007. 104 p.
13. Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground // *Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1896. Series 5. V. 41. P. 237–276.
14. Manabe S., Wetherald R.T. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1967. V. 24. No. 3. P. 241–259.
15. Water vapour: feedback or forcing? *Real Climate* [Internet resource] <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2005/04/water-vapour-feedback-or-forcing> (Accessed: 07.10.21).
16. Kiehl J.T., Trenberth K.E. Earth's annual global mean energy budget // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997. V. 78. No. 2. P. 197–208. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2
17. Doustimotlagh N., Saber M. Increasing CO₂ in atmosphere cannot increase the Earth's temperature [Internet resource] https://www.researchgate.net/publication/311986815_Increasing_CO_2_in_atmosphere_cannot_increase_the_Earth's_temperature (Accessed: 07.10.21).
18. Sorokhtin O.G. Evolution and forecast of changes in the global climate of the Earth. Moskva; Izhevsk: NITS “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2006. 87 p. (in Russian).
19. Malinin V.N. Moisture content of the atmosphere and the greenhouse effect // *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye (Terra Humana)*. 2014. No. 3 (32). P. 139–145 (in Russian).
20. Octyabrskiy V.P. A new look at the greenhouse effect // *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskiye nauki*. 2016. No. 2 (242). P. 82–86 (in Russian).
21. Ivanov A.Yu., Durmanov N.D., Orlov M.P., Pikesendeev K.V., Rovnov Yu.E., Luksha P.O., Makarov I.A., Ptichnikov A.V., Stepanov I.A., Kharchenko M.M., Chertkov G.M. Battle for the climate: carbon farming as Russia's stake: expert report / Eds. A.Yu. Ivanov, N.D. Durmanov. Moskva: Izd. Dom Vysshey shkoly ekonomiki, 2021. 120 p. (in Russian). doi: 10.17323/978-5-7598-2519-7
22. Bulatkin G.A. Assessment of the impact of managed forests on the balance of carbon dioxide in the earth's atmosphere // *Zhizn Zemli*. 2021. No. 1. P. 54–66 (in Russian).
23. Verma M., Verma A.K. Effect of plantation of genetically modified trees on the control of atmospheric carbon dioxide: A modeling study // *Natural Resource Modeling*. 2021. V. 34. No. 2. P. 1–24. doi: 10.1111/nrm.12300
24. Siemek J., Nagy S., Zawisza L. Carbon dioxide sequestration by injection to various geological reservoirs // *Acta Montanistica Slovaca Ročník*. 2006. V. 11. No. 1. P. 172–177.