

УДК 523.4-36

РАДИОЛИЗ КАК ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ СИНТЕЗА ПЕРХЛОРАТОВ НА МАРСЕ И ЕВРОПЕ

© 2024 г. Д. В. Белоусов^{*,а}, В. С. Чепцов^{б,с}, А. К. Павлов^а

^а ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^б МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^с Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: dom.999.bel@gmail.com

Поступила в редакцию 14.11.2023 г.

После доработки 21.11.2023 г.

Принята к публикации 11.01.2024 г.

Перхлораты обнаружены в составе реголита Марса и Луны, во льду Европы, в составе метеоритов. Понимание процессов образования и разрушения данных соединений важно как для понимания геологической и климатической эволюции ряда планет и тел Солнечной системы, так и для оценки возможности их обитаемости. К настоящему времени предложен ряд механизмов синтеза перхлоратов в условиях Марса, однако эти механизмы не объясняют наблюдаемых в реголите концентраций перхлората и неприменимы для безатмосферных тел, в частности Европы. Нами исследованы процессы синтеза и разрушения перхлоратов при облучении моделей льда и реголита высокоэнергичными электронами в условиях низкой температуры (-50°C) и при отсутствии атмосферы (при давлении 0.01 мбар). Полученные данные свидетельствуют о том, что перхлораты могут эффективно синтезироваться в реголите Марса и поверхностном слое льда Европы под действием облучения при отсутствии жидкой фазы или атмосферы.

Ключевые слова: Марс, Европа, космические лучи, радиолиз, астробиология

DOI: 10.31857/S0320930X24030035, **EDN:** NEEJPP

ВВЕДЕНИЕ

Перхлораты (ClO_4^-) были обнаружены прямыми методами в двух местах посадки космических аппаратов на Марсе в концентрациях от 0.5% до 1% (Hecht и др., 2009; Glavin и др., 2013). Предполагается, что перхлораты могут быть распространены по всей планете в верхних слоях реголита (Davila и др., 2013). Следует отметить, что Марс не является единственным объектом Солнечной системы, где были обнаружены перхлораты. В лунных образцах и метеоритах также были обнаружены перхлораты и хлораты (Jackson и др., 2015). Анализ инфракрасных спектров поверхности Европы показал присутствие перхлоратов магния и натрия (Ligier и др., 2016).

Наличие солей перхлоратов является важной особенностью марсианского реголита, влияющей на сохранность органики и возможность выживания микроорганизмов. Перхлораты могут выступать как в роли сильного окислителя, разрушающего органику и приводящего к гибели клеток, так и в роли источника энергии для микроорганизмов, а их растворы могут являться источником доступной воды при низких тем-

пературах (Cheptsov и др., 2021). Одновременно перхлораты могут быть индикатором геологических и климатических изменений на поверхности Марса. Так как перхлораты обладают высокой растворимостью в воде, их распределение может косвенно указывать на цикл жидкой воды на Марсе и на условия, при которых перхлораты образовывались.

На Земле перхлораты обнаруживаются, как правило, в засушливых областях (пустыня Атакама, Чили) в концентрациях, намного меньших, чем на Марсе. Образование перхлоратов на Земле происходит за счет фотохимических реакций атмосферного хлора с озоном. С другой стороны, фотохимический механизм образования перхлората на Марсе дает на порядки меньшую скорость образования данных соединений, чем необходимая для синтеза обнаруженного в реголите количества перхлората (Smith и др., 2014). Поэтому для объяснения современного содержания перхлората необходим процесс его синтеза с участием вещества поверхности Марса. На спутнике Юпитера Европе атмосфера практически отсутствует, поэтому механизмы формирования перхлоратов на поверхности с помощью атмосферных процессов

невозможны. В то же время Европа, находящаяся в радиационном поясе Юпитера, подвергается чрезвычайно интенсивному облучению прежде всего энергичными (≥ 1 МэВ) электронами (Paranicas и др., 2009). Из-за отсутствия плотной атмосферы и собственного магнитного поля, поверхность Марса подвергается сильному облучению галактическими (ГКЛ) и солнечными (СКЛ) космическими лучами (Pavlov и др., 2012). С учетом большой дозы облучения предполагается, что главным механизмом синтеза перхлората мог быть радиолиз хлорсодержащего марсианского грунта (Kim и др., 2013). С другой стороны, облучение может приводить также к разрушению перхлоратов (Turner и др., 2016). На настоящий момент механизм глобального синтеза перхлората на Марсе не определен. Был предложен механизм атмосферного синтеза перхлората из диоксида хлора, который образуется при облучении электронами или УФ-фотонами хлорсодержащего льда (Wilson и др., 2016). Эксперименты с хлорсодержащим CO_2 -льдом показали образование хлоратов (ClO_2 , ClO_3^-) при облучении высокоэнергичными электронами (Kim и др., 2013). В условиях наличия атмосферы экспериментально удалось получить анионы хлората (ClO_3^-) и перхлората (ClO_4^-) при облучении УФ-фотонами (Carriger, Kounaves, 2015).

В данной работе исследуются процессы синтеза и разрушения перхлоратов при облучении высокоэнергичными электронами. Наши результаты показывают, что перхлораты могут эффективно образовываться в реголите Марса и поверхностном слое Европы под действием облучения при отсутствии жидкой фазы или атмосферы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подготовка образцов и облучение

В качестве модельного марсианского грунта и поверхностного слоя льда Европы были исследованы три вида образцов: 1) хлорид натрия (NaCl) и дистиллированная вода, 2) хлорид натрия и диоксид кремния (SiO_2) и 3) хлорид натрия, диоксид кремния и дистиллированная вода. Для исследования эффекта разрушения перхлоратов были приготовлены образцы из чистого перхлората натрия (NaClO_4). Все использованные вещества имели чистоту не менее 98%. Перед подготовкой образцов перхлорат натрия и диоксид кремния помещались в сухожаровой шкаф при $\sim 100^\circ\text{C}$ для удаления остатков сорбированной воды. В качестве первого вида образцов использовался 30% раствор хлорида натрия. Смесь хлори-

да натрия и диоксида кремния готовилась путем добавления раствора хлорида натрия к диоксиду кремния с последующим нагревом в течение 3 ч. в сухожаровом шкафу. Третий вид образцов готовился при смешивании 30% раствора хлорида натрия и диоксида кремния.

Готовые смеси охлаждались до температуры -20°C и помещались в полиэтиленовые пакеты. Толщина и масса всех образцов составляла 2 мм и 1 г соответственно. Толщина образцов выбиралась исходя из глубины проникновения электронов с энергией 0.9 МэВ (табл. 1).

Облучение образцов проводилось в научно-технологическом комплексе “Ядерная физика” Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого с использованием резонансного ускорителя электронов РТЭ-1В. Энергия электронов на выходе ускорителя равна 0.9 МэВ, что позволяет моделировать облучение на поверхности Европы, а также моделировать воздействие вторичных электронов, создаваемых ГКЛ в реголите Марса (Paranicas и др., 2009; Pavlov и др., 2012). Для исследования процесса синтеза и разрушения перхлоратов в безатмосферной среде облучение образцов проводилось в вакуумной камере, подробно описанной ранее (Pavlov и др., 2022).

Облучение образцов проводилось при температуре -50°C и давлении 0.01 мбар. Облучение электронами происходило в сканирующем режиме с потоком электронов $4.5 \times 10^{12} \text{e}^- \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Во время всего эксперимента температура образцов измерялась датчиком температур с медно-константановыми термопарами (датчик сконструирован в лаборатории масс-спектрометрии ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия). После облучения образцы извлекались из вакуумной камеры и транспортировались для дальнейшего анализа. Значения доз облучения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Длина пробега электронов и доза облучения в зависимости от состава образцов^a

Состав образца	Длина пробега электронов, мм	Поглощенная доза, 10^4 Дж cm^{-2}
NaClO_4	2.3	1.6
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ (30% p-p)	3.7	1.0
SiO_2 (90%) + NaCl (10%)	2.7	1.4
SiO_2 (70%) + H_2O (21%) + NaCl (9%)	2.6	1.5

Примечание. ^aДлина свободного пробега и доза рассчитывались с помощью пакета Geant4 (Agostinelli и др., 2003). Результаты расчетов сравнивались с NISTESTAR.

Анализ образцов

Образцы транспортировались при температуре около -78°C (в сухом льду) и далее хранились при -18°C . В связи с высокой гигроскопичностью перхлоратов и возможностью поглощения ими паров воды из воздуха в ходе транспортировки и хранения (Gu и др., 2017), перед анализом все образцы помещались в стеклянные вials и высушивались или выпаривались при 150°C в течение 3 ч. Температура высушивания обусловлена тем, что при нагреве до 150°C происходит дегидратация соединений перхлората (Devlin, Herley, 1987). После высушивания отбирались навески массой ~ 50 мг (для образцов, облучавшихся в виде раствора, и соответствующих контрольных образцов) и ~ 500 мг (для образцов в смеси с песком) с точностью 0.1 мг. Навески помещались в полиэтиленовые стаканы с 50 мл дистиллированной воды.

Анализ полученных растворов проводился с помощью ионометрии (прямой потенциометрии) (Reznicek и др., 2023) с использованием перхлорат-селективного электрода XC-ClO₄-001 (Сенсорные системы, Россия), двухключевого хлор-серебряного электрода сравнения ЭСр-10101/3.5 (НПО Измерительная техника, Россия), заполненного 3.5 М раствором KNO₃, и иономера И-160М (ООО Антех, Беларусь). Перед началом измерений перхлорат-селективный электрод в течение суток выдерживался в 1×10^{-5} М растворе перхлората натрия, затем отмывался дистиллированной водой, согласно инструкциям производителя. Коэффициент селективности электрода в отношении хлорид-ионов составляет 1:1000, в связи с чем для анализа образцов, содержащих хлориды, калибровочные кривые строились в трех вариантах: а) в градиенте концентраций перхлората натрия от 1.63×10^{-1} М (2%) до 8.17×10^{-6} М ($1 \times 10^{-4}\%$); б) в градиенте концентраций хлорида натрия от 1.71 М (10%) до 8.56×10^{-3} М (0.05%); в) в градиенте концентраций перхлората натрия от 8.17×10^{-4} М ($1 \times 10^{-2}\%$) до 8.17×10^{-6} М ($1 \times 10^{-4}\%$) в присутствии 0.1% хлорида натрия. Выбор концентрации хлорида натрия для последнего варианта калибровки обусловлен тем, что концентрация NaCl в исследуемых растворах (с учетом указанных выше навесок, объема раствора и концентрации NaCl в исходных образцах) должна была составлять около 0.1%.

При снятии калибровочных кривых и при анализе образцов перхлорат-селективный электрод и электрод сравнения ополаскивались дистиллированной водой, затем помещались в анализируемый раствор и выдерживались в течение 2 мин., затем фиксировалась разность потенциалов. Далее концентрация перхлората в исследуемых об-

разцах определялась по калибровочным кривым. Коэффициент корреляции калибровочных кривых превышал 0.995. Для оценки ошибки измерений была приготовлена серия растворов перхлората натрия (пять навесок NaClO₄ с массами от 60 до 150 мг были растворены в 50 мл дистиллированной воды), измерена разность потенциалов и проведен расчет концентраций с помощью калибровочной кривой. Относительная ошибка измерений не превышала 2.5%.

Достоверность различий концентраций перхлората определялась с применением U-критерия Манна–Уитни с помощью пакета программ Statistica 7.0 (StatSoft, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В образцах NaClO₄, облученных ускоренными электронами, концентрация перхлорат-ионов достоверно снизилась ($p < 0.05$) и составляла в среднем 93.5% от контрольных значений.

Во всех облученных образцах с NaCl были обнаружены перхлорат-ионы. Разности потенциалов в растворах, полученных из данных образцов, варьировали в диапазоне 180–237 мВ, в то время как разность потенциалов для 0.1% раствора NaCl составляла около 362 мВ. Зафиксированные разности потенциалов не могли быть обусловлены присутствием NaCl, так как даже для 10% раствора хлорида натрия это значение составляло 289 мВ.

Концентрация перхлората натрия в образцах после облучения находилась в пределах от 0.61% до 8.25% (табл. 2). Количество синтезированного перхлората достоверно отличалось между всеми тремя вариантами состава образцов ($p < 0.05$). Наибольшие концентрации NaClO₄ (4.90%–8.25%) обнаруживались в облученном растворе хлорида натрия, наименьшие — в образцах песка с раствором хлорида натрия (0.61%–0.75%). Учитывая молярные массы NaCl и NaClO₄, можно рассчитать долю молекул NaCl, преобразовавшихся в NaClO₄ в ходе облучения. Эта величина изменялась от 3.24% до 13.12% и была наибольшей в растворе NaCl, а наименьшей — в SiO₂ с 30% раствором NaCl. Следует отметить, что полученные значения, вероятно, недооценивают количество разрушенных молекул NaCl, так как нами не учитывались газообразные продукты (в частности ClO₂), а также ионы ClO₂[–] и ClO₃[–], которые, вероятно, также образовывались в ходе эксперимента, как было показано в подобных экспериментах (Carrier, Kounaves, 2015; Kim и др., 2013). Используя значения поглощенной дозы из табл. 1, можно оценить количество синтезированных молекул перхлората на эВ поглощенной энергии электронов (табл. 2). Выход NaClO₄ в растворе NaCl в 3–10 раз превышал выходы в образцах с SiO₂.

Таблица 2. Количество перхлората натрия в облученных образцах

Состав образца	Повторность	Начальная концентрация NaCl, %	Концентрация NaClO_4 после облучения, %	Доля молекул NaCl, преобразованных в NaClO_4 , %	Выход NaClO_4 , 10^{-3} молекулы / эВ
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ (30% p-p)	1	30	5.69	9.05	4.5
	2	30	4.90	7.79	3.9
	3	30	8.25	13.12	6.5
SiO_2 (90%) + NaCl (10%)	1	10	1.34	6.40	1.3
	2	10	1.30	6.22	1.2
	3	10	0.96	4.56	0.9
SiO_2 (70%) + H_2O (21%) + NaCl (9%)	1	9	0.62	3.29	0.6
	2	9	0.75	3.96	0.7
	3	9	0.61	3.24	0.6

ОБСУЖДЕНИЕ

К ключевым результатам экспериментов можно отнести следующие:

1) обнаружение разрушения перхлоратов под действием энергичных электронов;

2) обнаружение эффективного синтеза ионов перхлората при отсутствии жидкой фазы и атмосферы при облучении хлорида натрия в различных матрицах (SiO_2 и водяной лед).

Наши результаты показывают, что порядка 6.5% перхлоратов разрушается при поглощенной дозе 10 эВ на одну молекулу перхлората при температуре 223 К, что соответствует 6.5×10^{-3} разрушенных ионов перхлората на один эВ поглощенной энергии электронов. Ранее процесс разрушения перхлоратов был подробно исследован в экспериментах по облучению электронами чистого гексагидрата перхлората магния ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) в вакууме (Turner и др., 2016). Первичными продуктами облучения ионов перхлоратов (ClO_4^-) являются хлораты (ClO_3^-) и атомарный кислород (O). Turner и др. (2016) получили, что $(8.0 \pm 2.5) \times 10^{-3}$ и $(4.6 \pm 1.3) \times 10^{-3}$ ионов перхлората на один эВ деградируют при температурах 160 и 260 К соответственно. Таким образом, наши результаты находятся в хорошем согласии с результатами Turner и др. (2016).

Количество синтезированного перхлората в образцах с NaCl сильно зависит от наличия SiO_2 и льда. В процессе облучения происходит поэтапное окисление хлоридов до ионов перхлоратов (ClO_4^-). Также синтезируются промежуточные продукты: ионы ClO^- , ClO_2^- , ClO_3^- (Carrier, Kounaves, 2015; Kim и др., 2013). Большой выход перхлоратов в образцах с NaCl и H_2O , чем в образцах NaCl и SiO_2 , может быть связан с высокой подвижностью радикалов O в случае воды. Также облученный водяной лед является источником

гидроксильных радикалов OH, которые вносят вклад в реакции окисления. С другой стороны, минеральная компонента играет роль катализатора в реакциях синтеза перхлората (Carrier, Kounaves, 2015). Здесь важно указать, что Carrier и Kounaves (2015) синтезировали перхлорат в камере, моделирующей атмосферу Марса. В наших экспериментах при облучении имели место реакции только в твердой фазе. Высокая подвижность радикалов O и OH в водяном льду при температуре 233 К (Johnson, Quickenden, 1997; Pavlov и др., 2022) может обеспечить эффективный синтез перхлоратов. Kim и др. (2013) обнаружили синтез ClO_2 и ClO_3 при облучении высокоэнергичными электронами хлорсодержащего льда в присутствии CO_2 в условиях высокого вакуума и низких температур, 10–80 К. Однако не были представлены ни доза облучения, ни концентрация синтезированных хлоратов, что делает невозможным количественное сравнение с нашими результатами.

Мощность поглощенной дозы ГКЛ на поверхности современного Марса составляет 0.076 Гр/год, тогда как на глубине 1 м мощность дозы равна 0.036 Гр/год (Hassler и др., 2014). При плотности реголита поверхности Марса $\rho = 2.8 \text{ г/см}^3$ (Hassler и др., 2014) мощность дозы ГКЛ, усредненная по слою в один метр, равна $3.3 \times 10^9 \text{ эВ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В табл. 3 приведена скорость синтеза перхлората в реголите Марса, рассчитанная на основании полученных нами данных. Согласно работе (Wilson и др., 2016), для получения современного содержания перхлоратов в реголите минимальная скорость синтеза хлорной кислоты (HClO_4) должна быть $7.7 \times 10^3 \text{ молекул см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (в слое 30 см) в предположении, что накопление перхлоратов происходило в течение всего Амазонийского периода ($\approx 3 \times 10^9$ лет). Исходя из данных, представленных в табл. 3, перхлораты могут накапливаться

до современных значений за несколько десятков миллионов лет при облучении потоком ГКЛ.

На Европе мощность поглощенной дозы электронов лежит в диапазоне от $\sim 10^4$ Гр/год на глубине 1 см до ~ 1 Гр/год на глубине 1 м (Pavlov и др., 2019). Перхлорат натрия и гексагидрат перхлората магния были обнаружены на поверхности Европы преимущественно в восточном полушарии, где происходит наиболее интенсивное облучение, в концентрациях $\sim (0.3\text{--}0.8)\%$ и $(0.6\text{--}4.2)\%$ соответственно (King и др., 2022). Хлорсодержащие соли (MgCl_2 , NaCl) присутствуют на поверхности Европы в концентрациях $< 10\%$ (King и др., 2022). Из табл. 3 следует, что на Европе синтез перхлоратов до значений 0.8% может происходить за десятки лет на поверхности (1 см) и сотни тысяч лет на глубине 1 м. Средняя скорость обновления поверхности Европы по оценкам составляет ~ 20 м за 10^8 лет (Ir и др., 1998). При данной скорости обновления поверхности и рассчитанной нами скорости образования перхлоратов, концентрации ClO_4 во льду могли бы существенно превышать наблюдаемые значения. Поскольку под действием облучения одновременно с синтезом происходит радиолиз перхлоратов, то при больших дозах вероятно возникновение баланса скорости образования и разрушения. Температура облучения в наших экспериментах значительно превышала температуры, характерные для Европы. Как показано Turner и др. (2016), температура влияет на скорость разрушения перхлоратов. В связи с этим для уточнения скорости синтеза и разрушения на Европе необходимо проведение экспериментов при более низких температурах (≤ 100 К). Тем не менее полученные нами данные подтверждают существование механизма синтеза перхлоратов на телах Солнечной системы, не имеющих атмосферы, в частности на Европе.

Таблица 3. Скорости синтеза перхлоратов на Марсе и Европе

Состав грунта	Скорость синтеза NaClO_4 (Марс), молекулы $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$	Скорость синтеза NaClO_4 (Европа ^а), молекулы $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ (30% p-p)	$(1.3\text{--}2.1) \times 10^5$	$(2.4\text{--}4.1) \times 10^{10}$
SiO_2 (90%) + NaCl (10%)	$(3.0\text{--}4.3) \times 10^4$	—
SiO_2 (70%) + H_2O (21%) + NaCl (9%)	$(2.0\text{--}2.3) \times 10^4$	—

Примечание. ^а Слой на глубине 1 см с плотностью 1 г/см³ (водяной лед) и мощностью дозы 10^4 Гр/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтез перхлоратов возможен непосредственно в реголите Марса и поверхностном слое Европы под действием облучения энергичными электронами и не требует наличия жидкой воды и атмосферы.

Под действием ГКЛ процесс накопления доз облучения, необходимых для достижения наблюдаемых концентраций перхлоратов в поверхностном слое реголита Марса, занимает несколько десятков миллионов лет.

В поверхностном слое льда Европы аналогичные концентрации перхлоратов могут накапливаться в течение от нескольких десятков лет до сотни тысяч лет под действием интенсивного облучения энергичными электронами радиационного пояса Юпитера при наличии достаточного содержания солей во льду.

При больших концентрациях перхлоратов большие дозы облучения приводят к существенному разрушению перхлоратов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 20-02-00470 (в части облучения); Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 122012400153 (в части ионометрии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytracek R., Cooperman G., Cosmo G., Degtyarenko P., Dell'Acqua A., Depaola G., Dietrich D., Enami R., Feliciello A., Ferguson C., Fesefeldt H., Folger G., Foppiano F., Forti A., Garelli S., Giani S., Giannitrapani R., Gibin D., Gómez Cadenas J., and 90 co-authors. Geant4 – a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2003. V. 506 (3). P. 250–303.

Carrier B.L., Kounaves S.P. The origins of perchlorate in the Martian soil // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42 (10). P. 3739–3745.

Cheptsov V., Belov A., Soloveva O., Vorobyova E., Osipov G., Manucharova N., Gorlenko M. Survival and growth of soil microbial communities under influence of sodium perchlorates // Int. J. Astrobiol. 2021. V. 20 (1). P. 36–47.

Davila A., Willson D., Coates J., McKay C. Perchlorate on Mars: A chemical hazard and a resource for humans // Int. J. Astrobiol. 2013. V. 12 (4). P. 321–325.

Devlin D.J., Herley P.J. Thermal decomposition and dehydration of sodium perchlorate monohydrate // Reactivity of solids. 1987. V. 3 (1–2). P. 75–84.

Glavin D.P., Freissinet C., Miller K.E., Eigenbrode J.L., Brunner A.E., Buch A., Sutter B., Archer Jr. P.D., Atreya S.K., Brinckerhoff W.B., Cabane M., Coll P., Conrad P.G., Coscia D., Dworkin J.P., Franz H.B., Grotzinger J.P.,

- Leshin L.A., Martin M.G., McKay C., and 8 co-authors.* Evidence for perchlorates and the origin of chlorinated hydrocarbons detected by SAM at the Rocknest aeolian deposit in Gale Crater // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2013. V. 118. P. 1955–1973.
- Gu W., Li Y., Tang M., Jia X., Ding X., Bi X., Wang X.* Water uptake and hygroscopicity of perchlorates and implications for the existence of liquid water in some hyperarid environments // *RSC advances*. 2017. V. 7 (74). P. 46866–46873.
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., Ehresmann B., Rafkin S., Eigenbrode J.L., Brinza D.E., Weigle G., Böttcher S., Böhm E., Burmeister S., Guo J., Köhler J., Martin C., Reitz G., Cucinotta F.A., Kim M.H., Grinspoon D., Bullock M.A., Posner A., Gómez-Elvira J., Vasavada A., Grotzinger J.P., Team M.S., Kemppinen O., and 432 co-authors..* Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // *Science*. 2014. V. 343. id. 1244797.
- Hecht M.H., Kounaves S.P., Quinn R.C., West S.J., Young S.M.M., Ming D.W. and 8 co-authors.* Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix lander site // *Science*. 2009. V. 325 (5936). P. 64–67.
- Ip W.H., Williams D.J., McEntire R.W., Mauk B.H.* Ion sputtering and surface erosion at Europa // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 829–832.
- Jackson W.A., Davila A.F., Sears D.W.G., Coates J.D., McKay C.P., Brundrett M., Estrada N., Bohlke J.K.* Widespread occurrence of (per)chlorate in the Solar System // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 430. P. 470–476.
- Johnson R.E., Quickenden T.I.* Photolysis and radiolysis of water ice on outer Solar System bodies // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102 (E5). P. 10985–10996.
- Kim Y.S., Wo K.P., Maity S., Atreya S.K., Kaiser R.I.* Radiation-induced formation of chlorine oxides and their potential role in the origin of Martian perchlorates // *J. Am. Chem. Soc.* 2013. V. 135 (13). P. 4910–4913.
- King O., Fletcher L.N., Ligier N.* Compositional mapping of Europa using MCMC modeling of near-IR VLT/SPHERE and Galileo/NIMS observations // *Planet. Sci. J.* 2022. V. 3:72. P. 19.
- Ligier N., Poulet F., Carter J., Brunetto R., Gourgeot F.* VLT/SINFONI observations of Europa: New insights into the surface composition // *Astron. J.* 2016. V. 151. id. 163.
- Paranicas C., Cooper J.F., Garrett H.B., Johnson R.E., Sturner S.J.* Europa's Radiation Environment and Its Effects on the Surface // *Europa* / Eds: Pappalardo R., McKinnon W., Khurana K. Tucson: Univ. Arizona Press, 2009. 529 p.
- Pavlov A.A., Vasilyev G., Ostryakov V.M., Pavlov A.K., Mahaffy P.* Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by cosmic rays // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. id. L13202.
- Pavlov A.K., Belousov D.V., Tsurkov D.A., Lomasov V.N.* Cosmic ray irradiation of comet nuclei: A possible source of cometary outbursts at large heliocentric distances // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 511. P. 5909–5914.
- Pavlov A., Cheptsov V., Tsurkov D., Lomasov V., Frolov D., Vasiliev G.* Survival of radioresistant bacteria on Europa's surface after pulse ejection of subsurface ocean water // *Geosciences*. 2019. V. 9. id. 9.
- Reznicek J., Bednarik V., Filip J.* Perchlorate sensing – Can electrochemistry meet the sensitivity of standard methods? // *Electrochimica Acta*. 2023. V. 445. id. 142027.
- Smith M.L., Claire M.W., Catling D.C., Zahnle K.J.* The formation of sulfate, nitrate and perchlorate salts in the Martian atmosphere // *Icarus*. 2014. V. 231. P. 51–64.
- Turner A.M., Abplanalp M.J., Kaiser R.I.* Mechanistic studies on the radiolytic decomposition of perchlorates on the Martian surface // *Astrophys. J.* 2016. V. 820. id. 127.
- Wilson E.H., Atreya S.K., Kaiser R.I., Mahaffy P.R.* Perchlorate formation on Mars through surface radiolysis-initiated atmospheric chemistry: A potential mechanism // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2016. V. 121 (8). P. 1472–1487.