

УДК 523.62-726

## ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОВ $\text{He}^{++}$ НА ФРОНТАХ МЕЖПЛАНЕТНЫХ И ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНЫХ ВОЛН

© 2022 г. О. В. Сапунова<sup>1, \*</sup>, Н. Л. Бородкова<sup>1, \*\*</sup>, Г. Н. Застенкер<sup>1, \*\*\*</sup>, Ю. И. Ермолаев<sup>1, \*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

\*e-mail: sapunova\_olga@mail.ru

\*\*e-mail: nlbor@mail.ru

\*\*\*e-mail: gzastenk@iki.rssi.ru

\*\*\*\*e-mail: yermol@cosmos.ru

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 18.04.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

В работе исследуются вариации параметров дважды ионизированных ионов гелия  $\text{He}^{++}$  ( $\alpha$ -частиц) плазмы солнечного ветра при пересечении фронтов ударных волн в бесстолкновительной плазме: межпланетных ударных волн (МУВ) и околоземной ударной волны (ОЗУВ). Используются данные измерений прибора БМСВ, установленного на спутнике СПЕКТР-Р. По данным этого прибора вычислены параметры протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра: скорость, температура, концентрация, величина и направление полного потока и относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$ . Показано, что абсолютная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  за фронтом ударной волны (как МУВ, так и ОЗУВ) увеличивается, а относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  падает за фронтом МУВ и возрастает за фронтом ОЗУВ. Получена корреляция изменения относительной концентрации ионов  $\text{He}^{++}$  с величиной угла между вектором магнитного поля и нормалью к фронту волны  $\theta_{\text{Вп}}$ : чем выше значение  $\theta_{\text{Вп}}$ , тем больше значение относительной концентрации ионов  $\text{He}^{++}$  за фронтом ударной волны.

DOI: 10.31857/S0016794022050108

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На фронтах ударных волн в бесстолкновительной плазме резко меняются все ее параметры — температура, скорость, концентрация ионов, направление и модуль магнитного поля. Процессы, определяющие структуру фронта, сильно зависят от параметров невозмущенной среды например, от направления магнитного поля относительно нормали к фронту, от соотношения теплового давления к магнитному, а также — от ионного состава плазмы солнечного ветра. Хотя концентрация альфа-частиц в солнечном ветре составляет, в среднем, около 5% от концентрации протонов, их вклад в динамическое давление может достигать до 20% от величины динамического давления протонов, что означает, что альфа-частицы могут нести немаловажную часть энергии и импульса солнечного ветра. Помимо этого, ионный состав на расстояниях порядка  $10^6$  км напрямую связан со свойствами верхней солнечной короны и механизмами формирования солнечного ветра, двумя основными компонентами которого являются протоны и  $\alpha$ -частицы. В связи с этим возникает необходимость изучать вариации содержания этих ионов в спокойном солнечном ветре и в воз-

мущенных областях [см., например, Ogilvie and Wilkerson, 1969; Formisano et al., 1970; Borovsky, 2008; Kasper et al., 2012; Safrankova et al., 2013a; Yermolaev et al., 2020 и ссылки в работе].

Вариации параметров ионов  $\text{He}^{++}$  на фронтах ударных волн и их вклад в процессы, протекающие на фронте, были впервые рассмотрены в работе Gosling et al. (1978), затем этот вопрос был изучен как с помощью моделирования [см., например, Scholer and Terasawa, 1990; Scholer, 1990; Trattner and Scholer, 1991], так и по экспериментальным данным [(см., например Borriani et al., 1982; Volkmer and Neubauer, 1985; Borodkova et al., 1986; Gedalin et al. 2016; Ofman et al., 2018)]. Большинство экспериментальных результатов по изучению тонкой структуры фронта ударной волны были получены на основании измерений магнитного поля с высоким временным разрешением, реже — по измерениям протонной составляющей плазмы солнечного ветра и совсем немногочисленные результаты были получены по исследованию параметров ионов  $\text{He}^{++}$  “внутри” фронта ударной волны.

До недавнего времени исследования  $\alpha$ -частиц в ударных волнах были сосредоточены в основ-

ном на их ускорении и нагреве. В работах [Trattner and Scholer, 1991, 1993] изучался нагрев протонов и  $\alpha$ -частиц в квазипараллельных ударных волнах с большими числами Маха, в то время как в работе [Scholer et al., 2002] для тех же ударных волн было исследовано ускорение протонов и  $\alpha$ -частиц. Влияние  $\alpha$ -частиц на структуру фронта ударной волны было рассмотрено в работах [Gedalin et al., 2017; Ofman et al., 2019]. С помощью гибридного моделирования было показано, что нестационарность и некомпланарность ударных волн усиливаются, если относительное содержание  $\alpha$ -частиц составляет 5–10%.

С запуском прибора БМСВ в составе эксперимента ПЛАЗМА-Ф на спутнике СПЕКТР-Р стало возможным изучение тонкой структуры фронтов бесстолкновительных ударных волн благодаря высокому временному разрешению прибора [Nemesek, 2013; Застенкер и др., 2013; Safrankova et al., 2013; Еселевич, 2017]. Таким образом, появилась возможность рассмотреть поведение компоненты солнечного ветра – ионов  $\text{He}^{++}$  при пересечении межпланетных ударных волн и околоземной ударной волны. Целью данной работы является изучение вариаций скорости, температуры и концентрации ионов  $\text{He}^{++}$  на фронте межпланетной и околоземной ударных волн в зависимости от параметров ударного фронта.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Для исследования использовались данные, полученные с помощью прибора БМСВ, функционировавшего с августа 2011 до 2019 гг. Прибор БМСВ представляет собой спектрометр плазмы для измерения энергетического спектра ионов в диапазоне 0.2–2.8 кэВ/заряд, а также вектора полного потока ионов, переносной скорости (в диапазоне от 200 до 750 км/с), ионной изотропной температуры (от 1 до 100 эВ) и концентрации (от 1 до 100 см<sup>-3</sup>).

Временное разрешение прибора БМСВ составляло 0.031 с для величины и направления потока плазмы солнечного ветра и 1.5 с для скорости, температуры и концентрации протонов и ионов  $\text{He}^{++}$ . Также в ряде случаев был доступен режим измерения скорости, температуры и концентрации протонов с разрешением 0.031 с. Детальное описание приведено в работах [[Nemesek et al., 2013; Застенкер и др., 2013; Safrankova et al., 2013; Еселевич и др., 2017].

Для вычисления параметров величин  $\beta_p$ ,  $\theta_{\text{Вн}}$  и  $M_{\text{MS}}$  вблизи фронтов ударных волн в большинстве случаев использовались данные магнитного поля с временным разрешением 0.092 с, полученные с помощью прибора MFI на спутнике WIND,

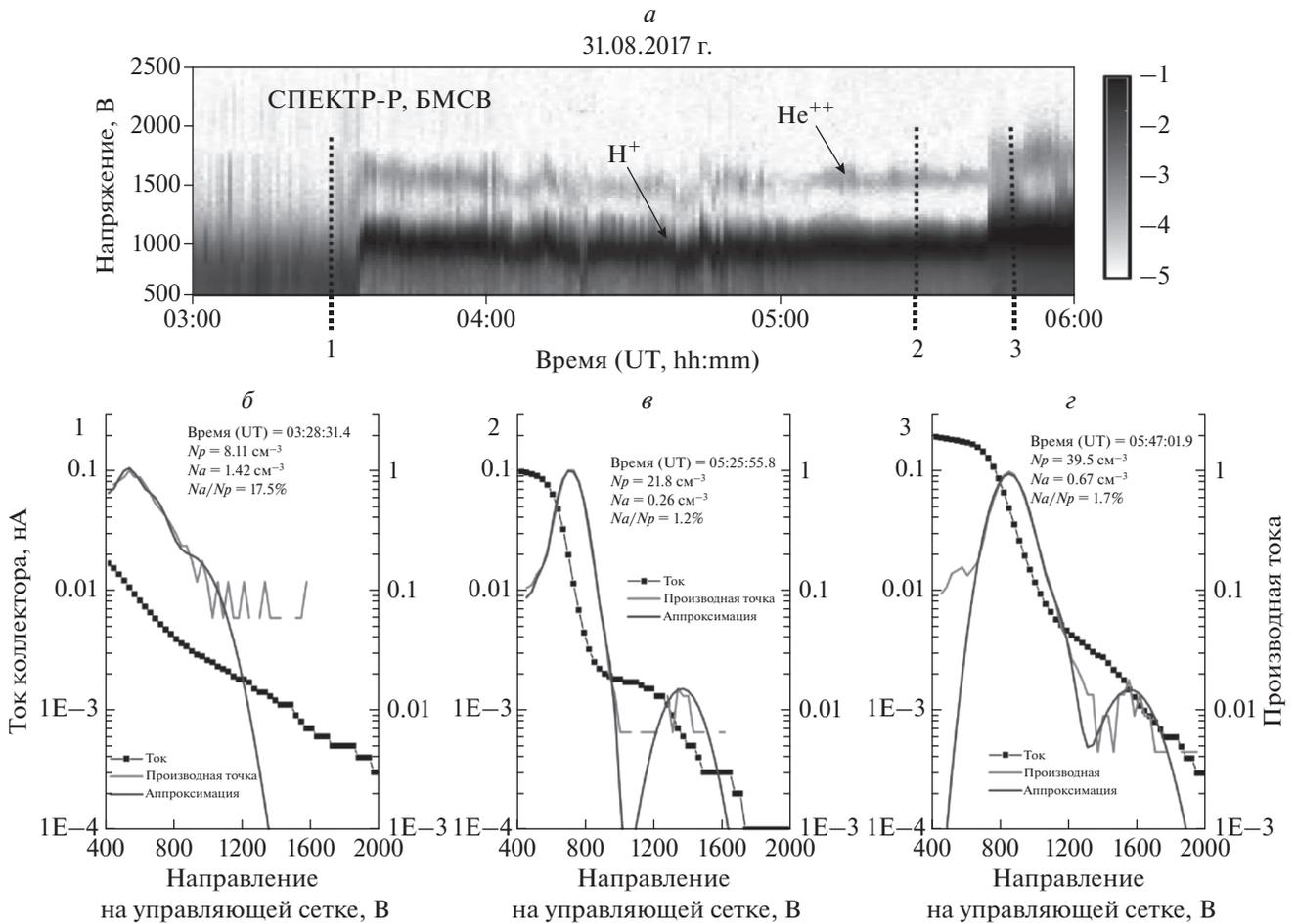
расположенном в солнечном ветре около первой точки либрации.

За период функционирования прибора БМСВ было зарегистрировано 57 межпланетных ударных волн, для которых был исследован временной ход основных параметров плазмы солнечного ветра, а также рассчитаны магнитозвуковое число Маха  $M_{\text{MS}}$ , угол  $\theta_{\text{Вн}}$  между направлением вектора магнитного поля перед фронтом и нормалью к фронту волны и параметр бета  $\beta_p$  – отношение газового давления к магнитному. Направление и модуль межпланетного магнитного поля были взяты со спутников WIND, THEMIS-B/THEMIS-C, Cluster 1–4 с соответствующим временным сдвигом.

Было также зарегистрировано множество пересечений ОЗУВ, из которых для 85 (выбор событий объясняется далее) были определены скорость, температура и концентрация протонов и ионов  $\text{He}^{++}$ , а также проведена оценка угла  $\theta_{\text{Вн}}$  по модели Веригина [Verigin et al., 2003] с использованием данных измерений магнитного поля на спутниках WIND, THEMIS-B/THEMIS-C, Cluster 1–4.

В качестве иллюстрации методики обработки данных на рис. 1 приведен отрезок времени от 31-го августа 2017 г., когда в течение нескольких часов были зарегистрированы оба типа событий – пересечение спутником околоземной ударной волны, а затем – прохождение межпланетной ударной волны. Стоит отметить, что для всего рассматриваемого периода удалось рассчитать параметры ионов  $\text{He}^{++}$ . На рис. 1а показаны динамические спектры потока плазмы солнечного ветра, зарегистрированные прибором БМСВ. В солнечном ветре и за фронтом МУВ отчетливо выделяются две популяции, обозначенные стрелками, – протонов и ионов  $\text{He}^{++}$  до, во время, и после прохождения ударной волны. В возмущенной области переходного слоя за фронтом ОЗУВ популяция ионов  $\text{He}^{++}$  заметна хуже ввиду больших температур ионов и падения скорости потока.

На рисунках 1б, 1в, 1г представлены примеры трехсекундных спектров измерений, время регистрации которых отмечено на рис. 1а соответственно цифрами 1, 2 и 3. Линия с маркерами показывает ток, измеренный датчиком прибора БМСВ в зависимости от напряжения на управляющей сетке. Производная тока показана сплошной серой линией, а темно-серой показана ее аппроксимация программой для расчета параметров. Сначала рассмотрим рис. 1в, как пример спокойного солнечного ветра. Можно видеть, что при невысоких температурах ионов в солнечном ветре (около 5 эВ для протонов и 10 эВ для ионов  $\text{He}^{++}$ ) кривая зависимости производной тока датчика от напряжения дает два четких отдельных



**Рис. 1.** Пересечения фронтов ОЗУВ и МУВ спутником СПЕКТР-Р 31 августа 2017 г. На рисунке представлены следующие панели: (а) динамический спектр потока плазмы солнечного ветра для 3-х часового интервала времени; (б–г) 3-х секундные спектры плазмы по данным прибора БМСВ для следующих областей: **1** – возмущенная область за фронтом ОЗУВ; **2** – спокойный солнечный ветер; **3** – возмущенная область за фронтом МУВ. Сплошная линия с маркерами – ток коллектора датчика в зависимости от напряжения на управляющей сетке, серая линия – производная тока, темно-серая – программная аппроксимация производной.

пика – протонный (на отметке  $\sim 700$  В) и ионов  $\text{He}^{++}$  (примерно на 1400 В). При этом “плато”  $\alpha$ -частиц почти на 2 порядка слабее протонного, в результате этого итоговая относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  составляет всего 1.2%, что близко к нижней границе чувствительности прибора. Следует отметить, что обычная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  в солнечном ветре составляет около 5%.

Перейдя к рассмотрению спектра возмущенного потока, сначала рассмотрим рис. 1г. За фронтом межпланетной ударной волны происходит ускорение и нагрев плазмы солнечного ветра, в результате чего протонный пик и пик ионов  $\text{He}^{++}$  расширяются и смещаются вправо на кривой зависимости тока датчика от напряжения, а максимальный ток увеличивается (для данного события – в 2 раза). При этом “плато” тока ионов  $\text{He}^{++}$  уве-

личивается слабо, что на фоне роста числа протонов приводит лишь к небольшому росту относительной концентрации  $\alpha$ -частиц – всего до 1.7%.

Не для всех МУВ было возможно определение параметров  $\alpha$ -частиц. Так как измеряемый диапазон энергий ограничивался 3 кэВ, то пик ионов  $\text{He}^{++}$  мог смещаться за пределы измеряемого диапазона энергий. Также в случае очень больших температур ( $>60-70$  эВ для протонов) пики обоих сортов ионов “размываются” (при этом накладываясь друг на друга) настолько, что определение параметров  $\alpha$ -частиц становилось невозможным или давало слишком большую погрешность.

Теперь вернемся к рис. 1б. По сравнению с рисунками 1в и 1г отчетливо видно, что максимальный ток за фронтом ОЗУВ почти на порядок меньше, чем в случае спокойного солнечного ветра. Температура достаточно велика, а скорость

потока мала (пики сдвинуты сильно влево), что делает обработку этих спектров достаточно сложной. Также за фронтом ОЗУВ распределение частиц по энергиям начинает заметно отличаться от максвелловского распределения. Плато ионов  $\text{He}^{++}$  при этом незначительно меньше, чем в невозмущенном солнечном ветре, а поток протонов падает сильно, в результате относительная концентрация  $\alpha$ -частиц может достигать очень больших значений (в данном случае — 17.5%). Описанные выше сложности привели к уменьшению количества событий ОЗУВ, “пригодных” для обработки.

Таким образом, было отобрано 20 межпланетных ударных волн и 85 пересечений околоземной ударной волны, для которых можно было выделить поток ионов  $\text{He}^{++}$  в течение прохождения фронта. Для каждого события были посчитаны параметры протонов и ионов  $\text{He}^{++}$ : скорость, температура и концентрация (для ионов  $\text{He}^{++}$  — как абсолютное, так и относительное значение по отношению к концентрации протонов).

### 3. ПРИМЕРЫ ВЫЧИСЛЕННЫХ ПО ДАННЫМ ПРИБОРА БМСВ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОНОВ И ИОНОВ $\text{He}^{++}$

В качестве примера обработанных данных на рис. 2 приведен отрезок времени того же события — от 31-го августа 2017 г., когда в течение нескольких часов были зарегистрированы оба типа событий — пересечение спутником околоземной ударной волны, а затем — прохождение межпланетной ударной волны. Измеренные параметры потока плазмы для всего периода приведены на рис. 2а. Для более детального рассмотрения моментов пересечений ударных волн на рис. 2б и рис. 2в представлены интервалы по 10 мин для ОЗУВ и МУВ соответственно.

Пересечение границ областей (ОЗУВ—СВ и СВ—МУВ) приводит к изменению всех параметров. Вполне ожидаемо, что скорость потока ионов (как протонов, так и ионов  $\text{He}^{++}$ ) в возмущенной области за фронтом ОЗУВ ниже (примерно на 25%), чем в солнечном ветре, а температура — выше (примерно в 3 раза). При этом за фронтом МУВ возрастают оба этих параметра для обоих сортов частиц (на 10% и в 2.5 раза соответственно), а температура ионов  $\text{He}^{++}$  в среднем в 2 раза выше температуры протонов. Стоит отметить, что последний параметр остается самым сложным для определения параметром и его абсолютные значения могут испытывать сильные вариации.

Несколько интереснее обстоит дело с концентрациями ионов (как абсолютной, так и относительной). За фронтом ОЗУВ концентрация протонов может упасть (в ряде случаев — значительно) по сравнению с солнечным ветром, однако

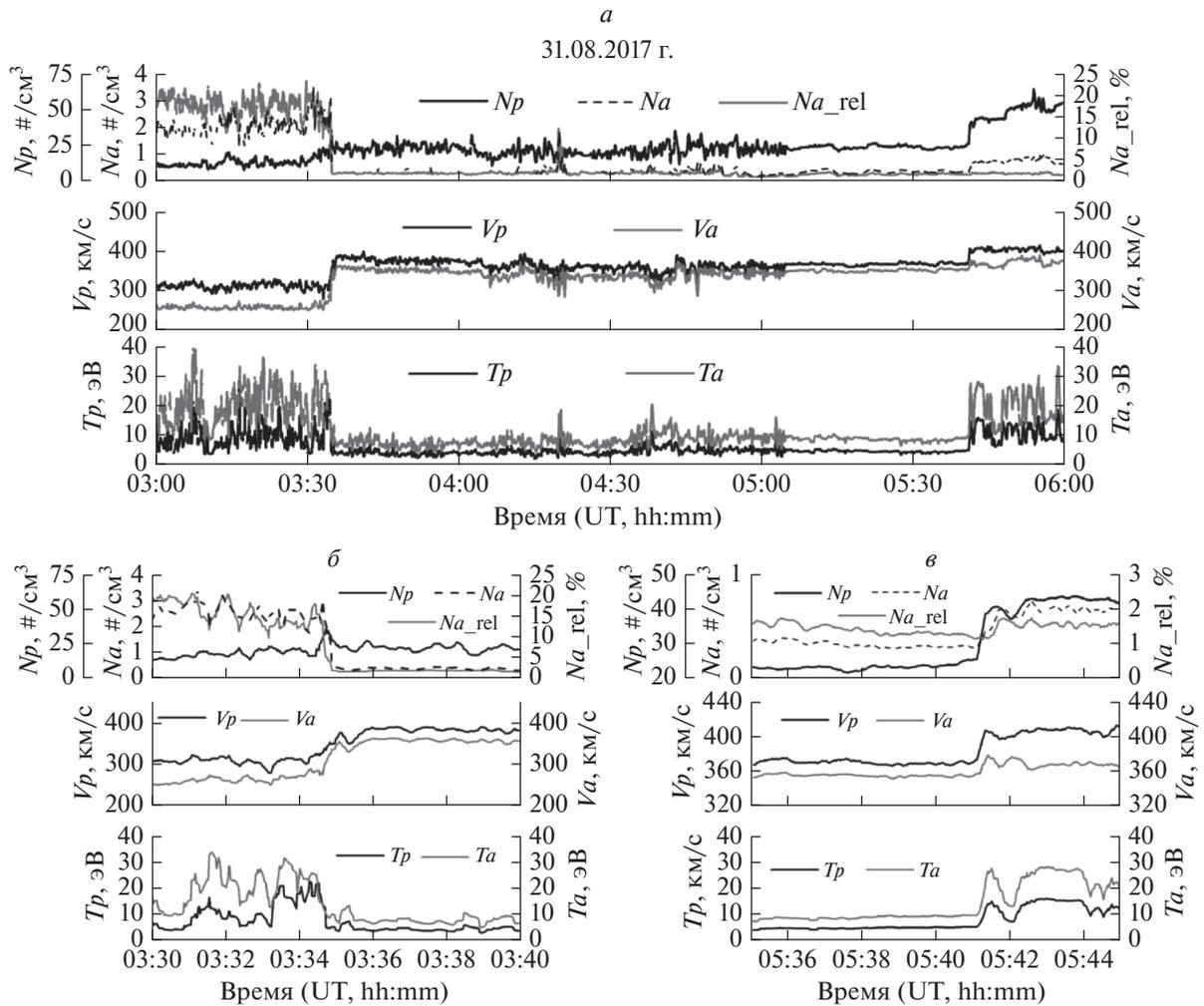
концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  растет, что приводит к существенному возрастанию относительной концентрации  $\alpha$ -частиц (с 2–3% до 20%). Эти результаты согласуются с полученными при моделировании [Ofman et al., 2019]. За фронтом МУВ концентрация протонов, наоборот, значительно возрастает, в следствии чего относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  увеличивается не столь радикально (всего на 1–2%), а во многих событиях оказывается даже ниже, чем в невозмущенном солнечном ветре [Sapunova et al., 2020].

### 4. СТАТИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ПРОТОНОВ И ИОНОВ $\text{He}^{++}$ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ МУВ И ОЗУВ

Полученные по вышеописанной методике параметры ионов (как протонов, так и ионов  $\text{He}^{++}$ ) были сведены в таблицы, для которых были построены гистограммы распределения.

На рисунке 3 приведены данные по изменению скорости обоих сортов ионов как для случая пересечения МУВ (рис. 3а), так и для случаев пересечения ОЗУВ (рис. 3б). Скорость протонов редко превышала 500 км/с в невозмущенном солнечном ветре, что во многом объясняется “слабостью” 24-го солнечного цикла [Yermolaev et al., 2021]. Даже в возмущенной области за фронтом МУВ было зафиксировано лишь одно событие со скоростью более 700 км/с. Скорость же ионов  $\text{He}^{++}$  в среднем оказывается меньше скорости протонов. Разница обычно составляет около 5%. При пересечении фронта МУВ скорости обоих сортов ионов растут (диапазон роста скорости протонов достаточно широк — от 15 до 250 км/с), при пересечении же фронта ОЗУВ — падают (скорость протонов — на 20–120 км/с, скорость ионов  $\text{He}^{++}$  — на 15–150 км/с). В случае МУВ разброс скачка скорости зависит от источника ударной волны, в случае же ОЗУВ — в основном от места регистрации пересечения — около подсолнечной точки поток тормозится и отворачивает сильнее. В возмущенной области разница скоростей протонов и ионов  $\text{He}^{++}$  увеличивается в среднем до 10% от скорости протонов. Это может быть связано как с увеличением альвеновской скорости, так и с выбором интервала для усреднения, поскольку в возмущенной области параметры испытывают значительные вариации. Данные результаты вполне предсказуемы и согласуются с ранее полученными данными.

На рисунке 4 приведены аналогичные рис. 3 гистограммы — для температуры обоих сортов ионов. Выше уже отмечалось, что температура является наиболее сложным для определения параметром и ее абсолютное значение в конкретный момент времени может быть неинформативным. Однако, при усреднении за некоторый интервал и



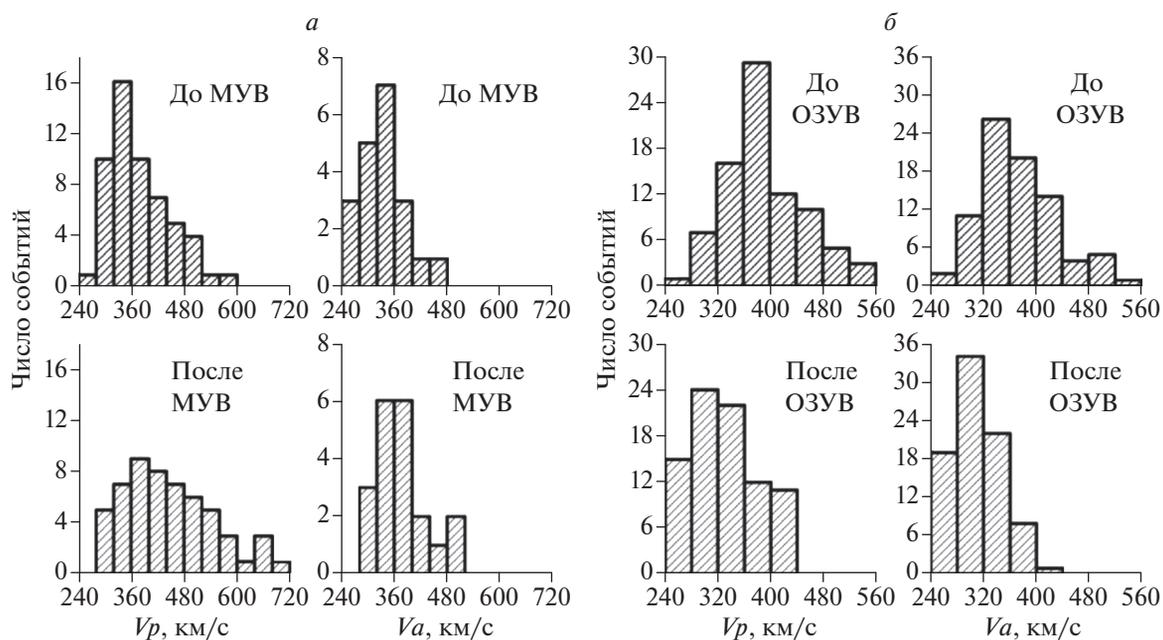
**Рис. 2.** Параметры плазмы в период 03:00–06:00 31 августа 2017 г. (а). Выделенный интервал при пересечении ОЗУВ (б). Выделенный интервал при пересечении МУВ (в). Обозначения одинаковы для всех трех панелей. Верхняя часть: черная сплошная линия – абсолютная концентрация протонов, черная прерывистая линия – абсолютная концентрация дважды ионизированного гелия, серая сплошная линия – относительная концентрация дважды ионизированного гелия. Средняя часть: черная линия – скорость протонов, серая – ионов He<sup>++</sup>. Нижняя часть: черная линия – температура протонов, серая – ионов He<sup>++</sup>.

сравнении полученных результатов для областей до/после фронта ударной волны (как МУВ, так и ОЗУВ), можно получить вполне надежные значения.

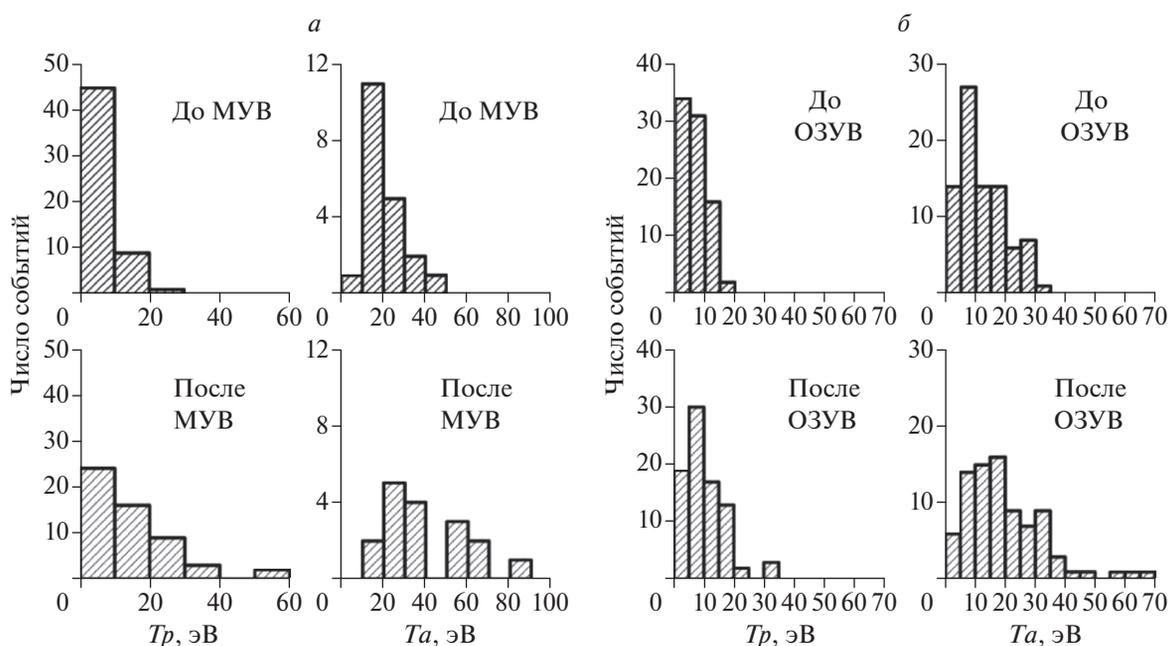
В невозмущенном солнечном ветре температура потока протонов в большинстве событий лежит в пределах 5–10 эВ. Температура ионов He<sup>++</sup> обычно в 2 раза больше и составляет 10–20 эВ. Как и следует из определения прямой МУВ, температура ионов солнечного ветра должна увеличиваться в возмущенной области, что мы видим на рис. 4а. В среднем, она растет для протонов в 2.2 раза, аналогично температуре α-частиц. При этом температура ионов He<sup>++</sup> также в 2 раза больше температуры протонов. Подобная картина наблюдается и для случаев пересечения ОЗУВ, хотя

и с большими вариациями. Рост температуры протонов составляет 150–300%, рост температуры ионов гелия He<sup>++</sup> – 120–340%. Отчасти это объясняется трудностями вычисления данного параметра. В целом полученные результаты предсказуемы и согласуются с нашими представлениями об ОЗУВ и МУВ.

Наконец, самым интересным для обсуждения оказалось изменение относительной концентрации α-частиц. На рисунке 5 представлены гистограммы распределения двух параметров – абсолютной и относительной концентрации ионов He<sup>++</sup> для пересечений обоих типов ударных волн. В случае МУВ средняя относительная концентрация падает на 8.5%, хотя абсолютная – увеличивается примерно в 2 раза. Причины этого уже бы-



**Рис. 3.** Гистограмма распределения скоростей протонов и  $\text{He}^{++}$  для обоих видов событий: (а) для МУВ, (б) для ОЗУВ. Верхний ряд гистограмм – невозмущенный солнечный ветер. Нижний ряд – за фронтом ударной волны.

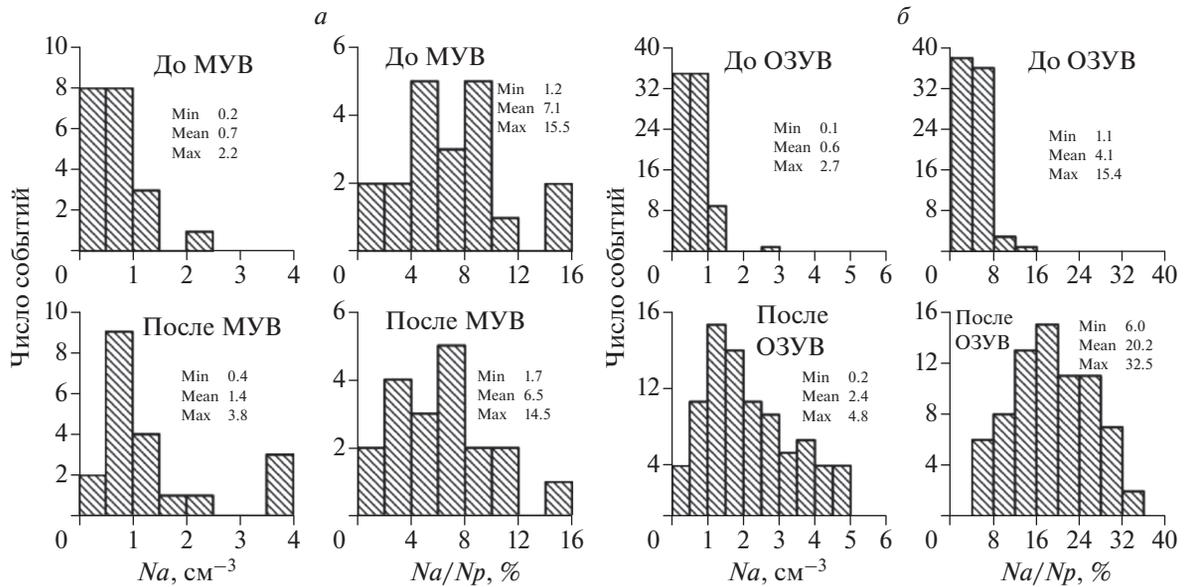


**Рис. 4.** Гистограммы распределения температуры протонов и  $\text{He}^{++}$  для обоих видов событий: (а) для МУВ, (б) для ОЗУВ. Верхний ряд гистограмм – невозмущенный солнечный ветер, нижний ряд – за фронтом ударной волны.

ли показаны, в том числе в выше приведенном событии, – несмотря на рост абсолютной концентрации  $\alpha$ -частиц, увеличение числа протонов превосходит этот рост в относительных величинах. В случае же ОЗУВ относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  не только не падает, но и значительно растет (иногда – на порядок, с 2 до 20%) за

фронтом ударной волны. Это обуславливается одновременным ростом как абсолютной концентрации  $\alpha$ -частиц, так и падением абсолютной концентрации протонов.

Так как общая статистика по концентрации ионов  $\text{He}^{++}$  вызвала интерес, решено было рассмотреть изменение относительной концентра-



**Рис. 5.** Гистограммы распределения абсолютной и относительной концентрации ионов He<sup>++</sup> для обоих видов событий: (а) для МУВ, (б) для ОЗУВ. Верхний ряд гистограмм – невозмущенный солнечный ветер, нижний ряд – за фронтом ударной волны.

ции ионов He<sup>++</sup> в зависимости от величин  $\beta_p$ ,  $\theta_{Вн}$  и  $M_{MS}$ . Ввиду отсутствия магнитного поля на спутнике СПЕКТР-Р для случаев пересечения ОЗУВ был доступен только один параметр – модельный угол  $\theta_{Вн}$ . Для событий МУВ были рассчитаны все три параметра и по ним проведен поиск зависимостей. Результаты были подробно изложены в работе [Sarpinova et al., 2020]. Здесь мы лишь отметим, что не было обнаружено явной зависимости изменения относительной концентрации ионов He<sup>++</sup> от параметров  $\beta_p$  и  $M_{MS}$ . При этом была отмечена тенденция к большему падению относительной концентрации при уменьшении угла  $\theta_{Вн}$ . Ввиду малого количества МУВ, подходящих для обработки параметров  $\alpha$ -частиц, было решено расширить статистику, взяв также пересечения ОЗУВ. Результаты приведены на рис. 6.

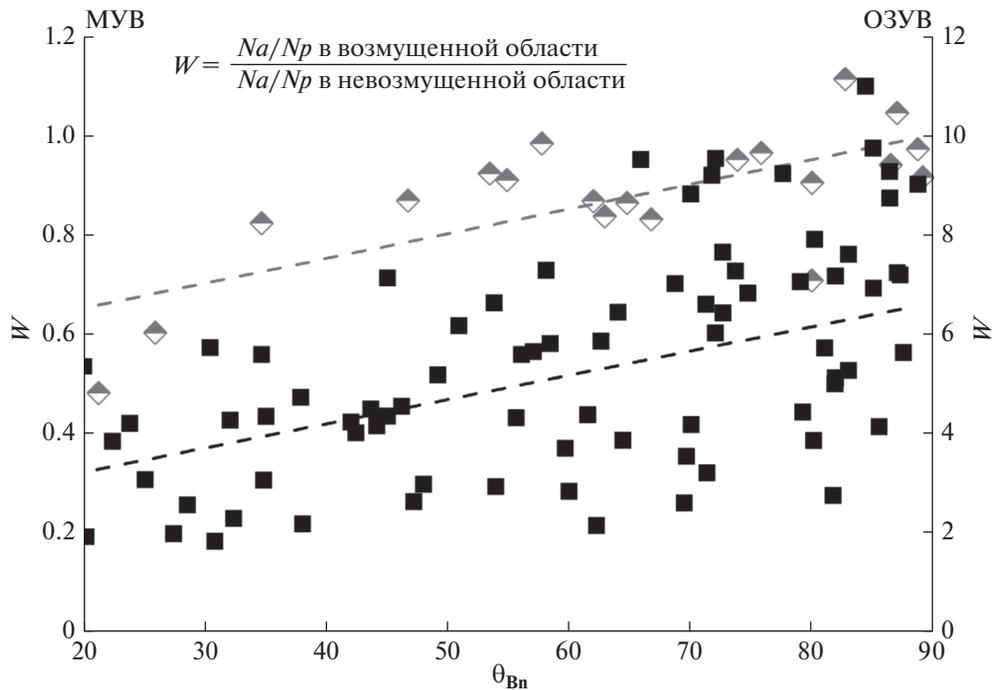
Как уже было отмечено, для случаев МУВ при уменьшении угла  $\theta_{Вн}$ , падает и относительная концентрация за фронтом. В случае же ОЗУВ относительная концентрация всегда больше в возмущенной области, но чем больше угол  $\theta_{Вн}$ , тем сильнее растет этот параметр (выявлены случаи с ростом на порядок и больше), что в наложении на зависимость МУВ дает очень похожую картину.

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Уменьшение относительной концентрации  $\alpha$ -частиц за фронтом межпланетной ударной волны при переходе от квазиперпендикулярному к квазипараллельному варианту может быть свя-

зано с истечением части ионов He<sup>++</sup> из возмущенной области в невозмущенную сквозь рампы ударной волны ввиду уменьшению угла  $\theta_{Вн}$ , в результате чего такой переход становится более эффективным. В исследовании [Trattner and Scholer, 1991, 1993] показаны результаты моделирования поведения отраженных ионов He<sup>++</sup> в случае квазипараллельной МУВ. Отмечена диффузия в невозмущенную область части ионов (как протонов, так и ионов He<sup>++</sup>), при этом относительное содержание ионов He<sup>++</sup> в отраженном потоке может быть сравнимо с таковым в невозмущенном солнечном ветре. Данный результат согласуется с наблюдаемой на рис. 6 зависимостью для квазипараллельной МУВ – значительная часть  $\alpha$ -частиц может уйти из возмущенной области, из-за чего падает относительная концентрация ионов He<sup>++</sup> за фронтом МУВ. Помимо этого, результаты, опубликованные в работе [Gosling et al., 1978], позволяют предположить, что механизм ускорения низкоэнергичных ионов на квазипараллельной МУВ может быть односторонним, что также может объяснить (или дополнить) полученный результат.

В случае квазиперпендикулярной межпланетной ударной волны величина Na/Np в невозмущенном ветре может быть сравнимо с ее значением за фронтом или даже больше. Это можно объяснить как сложностью диффузии ионов поперек магнитного поля, так и изменениями в механизмах нелинейного укручения ударной волны. Результаты моделирования, опубликованные в литературе, обычно подробно описывали отражен-



**Рис. 6.** Изменение относительной концентрации ионов  $\text{He}^{++}$  в возмущенной области по отношению к невозмущенной для МУВ и ОЗУВ в зависимости от угла  $\theta_{\text{Вн}}$ . Черными квадратами отмечены события ОЗУВ, серыми ромбами — события МУВ.

ные ионы, но не популяции, прошедшие за рампы. Однако, недавняя статья [Ofman et al., 2019] продемонстрировала возможность значительного увеличения содержания относительной концентрации ионов  $\text{He}^{++}$  за фронтом ударной волны. Результаты, полученные в данной работе, согласуются с результатами моделирования, представленными в работе [Ofman et al., 2019].

Было показано, что увеличение относительной концентрации ионов  $\text{He}^{++}$  происходит как при пересечении МУВ, так и при пересечении ОЗУВ, и в обоих случаях наклон зависимости аналогичным образом зависит от угла  $\theta_{\text{Вн}}$ . Таким образом, наблюдения могут свидетельствовать, что в обоих типах пересечений имеет место идентичный физический механизм. Разница в абсолютных значениях, вероятнее всего, обусловлена различием в ионном составе.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя данные прибора БМСВ, были подсчитаны параметры ионов  $\text{He}^{++}$  (скорость, температура, концентрация абсолютная и относительная) для 20-ти межпланетных ударных волн и 85-ти пересечений околоземной ударной волны. Было показано, что средняя относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  за фронтом межпланетной ударной волны немного меньше (~на 9%), чем в

невозмущенной области, при этом максимальное значение этого параметра оказалось даже меньше за фронтом МУВ. Однако за фронтом ОЗУВ этот параметр всегда выше, чем в невозмущенном солнечном ветре. Были построены графики зависимости данной величины от угла  $\theta_{\text{Вн}}$  как для случаев МУВ, так и для случаев ОЗУВ. В обоих типах пересечений выявлена корреляция с углом  $\theta_{\text{Вн}}$ : чем меньше значение угла  $\theta_{\text{Вн}}$ , тем сильнее падает относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  за фронтом МУВ и тем меньше увеличивается относительная концентрация ионов  $\text{He}^{++}$  за фронтом ОЗУВ.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность NASA CDAWEB за возможность использования данных о параметрах плазмы и магнитного поля, измеренных на спутниках WIND, Cluster.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И. Наблюдения ионов  $\text{He}^{++}$  в солнечном ветре // Космич. исслед. Т. 32. № 1. С. 93–125. 1994.
- Еселевич В.Г., Бородкова Н.Л., Еселевич М.В., Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З., Прех Л. Тонкая структура фронта межпланетной ударной волны по измерениям ионов солнечного ветра с высоким временным разрешением // Космич. исслед. Т. 55. № 1.

- C. 32–47. 2017.  
<https://doi.org/10.7868/S0023420617010034>
- *Zastenker G.N., Shafrankova Ya., Nemecek Z. и др.* Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ. // Космич. исслед. Т. 51. № 2. С. 83–175. 2013.  
<https://doi.org/10.7868/S0023420613020088>
- *Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И.* Поведение ионов He<sup>++</sup> на фронте межпланетной ударной волны // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. С. 708–713. 2020.  
<https://doi.org/10.1134/S0016793220060122>
- *Borodkova N.L., Vaisberg O.L., Zastenker G.N.* Interplanetary shock waves in the post solar maximum year period (January–July, 1981) // Adv. Space Res. V. 6. № 6. P. 327–330. 1986.  
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(86\)90170-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(86)90170-5)
- *Borrini G., Gosling J.T., Bame S.J., Feldman W.C.* An Analysis of shock wave disturbances observed at 1 AU from 1971 through 1978 // J. Geophys. Res. V. 87. № A6. P. 4365–4373. 1982.  
<https://doi.org/10.1029/JA087iA06p04365>
- *Formisano V., Palmiotto F., Moreno G.*  $\alpha$ -particle observations in the solar wind // Solar Phys. V. 15. № 2. P. 479–498. 1970.  
<https://doi.org/10.1007/BF00151853>
- *Gedalin M.* Effect of alpha particles on the shock structure // J. Geophys. Res. V. 122. P. 71–76. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA023460>
- *Gosling J.T., Asbridge J.R., Bame S.J., Paschmann G., Sckopke N.* Observation of two distinct population of bow shock ions in the upstream solar wind // Geophys. Res. Lett. V. 5. P. 957–960. 1978.  
<https://doi.org/10.1029/GL005i011p00957>
- *Nemecek Z., Safrankova J., Goncharov O., Prech L., Zastenker G.N.* Ion scales of quasi-perpendicular interplanetary shocks // Geophys. Res. Lett. V. 40. № 16. P. 4133–4137. 2013.  
<https://doi.org/10.1002/grl.50814>
- *Ofman L., Koval A., Wilson L.B., Szabo A.* Understanding the role of  $\alpha$  particles in oblique heliospheric shock oscillations // J. Geophys. Res. V. 124. P. 2393–2405. 2019.  
<https://doi.org/10.1029/2018JA026301>
- *Ogilvie K.W., Wilkerson T.D.* Helium abundance in the solar wind // Solar Phys. V. 8. № 2. P. 435–449. 1969.  
<https://doi.org/10.1007/BF00155391>
- *Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al.* Fast Solar Wind Monitor (BMSW): Description and First Results // Space Sci. Rev. V. 175. № 1–4. P. 165–182. 2013.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
- *Scholer M., Terasawa T.* Ion reflection and dissipation at quasiparallel collisionless shocks // Geophys. Res. Lett. V. 17. P. 119–122. 1990.  
<https://doi.org/10.1029/GL017i002p00119>
- *Scholer M.* Diffuse ions at quasi-parallel collisionless shocks: simulations // Geophys. Res. Lett. V. 17. P. 1821–1824. 1990.  
<https://doi.org/10.1029/GL017i011P01821>
- *Scholer M., Kucharek H., Kato C.* On ion injection at quasiparallel shocks // Phys. Plasmas. V. 9. P. 4293. 2002.  
<https://doi.org/10.1063/1.1508441>
- *Trattner K.J., Scholer M.* Diffuse alpha particles upstream of simulated quasi-parallel supercritical collisionless shocks // Geophys. Res. Lett. V. 18. № 10. P. 1817–1820. 1991.  
<https://doi.org/10.1029/91GL02084>
- *Trattner K.J., Scholer M.* Distributions and thermalization of protons and alpha particles at collisionless quasiparallel shocks // Ann. Geophys. V. 11. P. 774–789. 1993.
- *Verigin M., Slavin J., Szabo A., Gombosi T., Kotova G., Plochova O., Szegö K., Tátrallyay M., Kabin K., Shugaev F.* Planetary bow shocks: Gasdynamic analytic approach // J. Geophys. Res. V. 108(A8). P. 1323. 2003.  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009711>
- *Volkmer P.M., Neubauer F.M.* Statistical properties of fast magnetoacoustic shock waves in the solar wind between 0.3 AU and 1 AU: Helios-1, 2 observations // Ann. Geophys. V. 3. № 1. P. 1–12. 1985. Abstract.
- *Yermolaev Yu.I., Zhuravlev V.I., Zastenker G.N., Kogan V.T., Koshevenko B.V.* Observations of singly ionized helium in the solar wind // Cosmic Res. V. 27(5). P. 614–621. 1989. Abstract.
- *Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A.* Drop of Solar Wind at the End of the 20th Century // J. Geophys. Res. V. 126(9). 2021.  
<https://doi.org/10.1029/2021JA029618>