

## О причинах появления резонансного рассеяния на возбуждённых ионах газовых компонент атмосферы

В. В. Бычков, С. Ю. Хомутов

*Институт космических исследований и распространения радиоволн  
ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край, 684034, Россия  
E-mail: vasily.v.bychkov@gmail.com*

Обсуждаются результаты анализа данных лидарного зондирования атмосферы в диапазоне высот 25–500 км, полученных на лидарной станции Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (Камчатка, 53° с. ш., 158° в. д.). Зарегистрированное светорассеяние в ионосфере вызвано появлением процесса ионизации. В ночное время это высыпания потоков электронов. Приводится анализ геофизической обстановки во время высыпания электронов в атмосферу осенью 2017 г. и зимой 2021–2022 гг. Исследовались вариации компонент геомагнитного поля за 23.09.2017 по данным дальневосточных обсерваторий России и Аляски. В ходе спокойной суточной вариации магнитного поля (МП) выделяются две аномалии — в ранние утренние и затем в дневные часы (по UTC (*англ.* Coordinated Universal Time)). Показано, что эпицентр аномалий находится на Аляске. Особенности вариаций горизонтальной и восточной компоненты МП Аляски позволяют уточнить положение эпицентров аномалий. Во время первой аномалии он находился севернее всех пунктов наблюдений МП и западнее самого восточного пункта. Во время второй аномалии эпицентр располагался южнее всех пунктов наблюдений МП и восточнее самого западного пункта. Обосновывается предположение о том, что вариации МП и высыпания электронов могли происходить в результате экспериментов по нагреву ионосферы.

**Ключевые слова:** атмосфера, мезосфера, нагрев ионосферы, высыпания электронов, лидар

Одобрена к печати: 05.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-370-382

### Введение

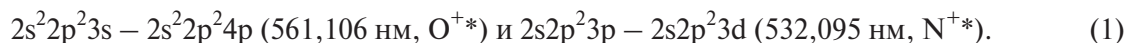
Использование резонансного рассеяния при распространении лазерного излучения в верхней атмосфере было впервые предложено в 1964 г. для исследования металлических слоёв ионов Na. Обзор результатов первого десятилетия этих исследований приведён в работе (Костко, 1975). Для металлических ионов сечение резонансного рассеяния имеет порядок  $10^{-13} \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ , что на 13–14 порядков превышает сечение молекулярного рассеяния для основных газовых компонент атмосферы. Для газовых составляющих сечение резонансного рассеяния имеет значения от  $10^{-12}$  до  $10^{-21} \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$  по разным электронным переходам. Высокие величины сечения рассеяния дают возможность получать обратный лидарный сигнал из области высот нижней термосферы.

В большинстве опубликованных работ используется рассеяние на металлических ионах, что объясняется их большим сечением резонансного рассеяния и появлением на высотах 80–140 км. Созданы лидарные системы, позволяющие измерять содержание ионов, температуру, скорость ветра и их динамику в меняющихся геофизических условиях (Collins et al., 1996, 2015; Kawahara et al., 2017; Tsuda et al., 2013). Следует отметить, что во всех этих исследованиях использовалась регистрация резонансного рассеяния на ионах многоэлектронных атомов или молекулярных ионах (Collins et al., 1997, 2006) в основном состоянии, время жизни которых определяется столкновениями и сравнительно велико. Рассеяние на возбуждённых ионах атомарного азота, время жизни которых составляет 13 нс, обнаружено на Камчатке в 2008 г. (Бычков, Шевцов, 2012).

В период с августа по начало ноября 2017 г. на лидарной станции Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН) (Камчатка) зарегистрировано семь случаев появления слоя повышенного светорассеяния в области 200–

400 км. Рассеяние наблюдалось на длинах волн 532 и 561 нм, обычно в течение нескольких часов и всегда в одном и том же высотном интервале. В работах (Бычков, Середкин, 2020; Vuchkov, 2023) обсуждаются использованные методы лидарных измерений и обработки данных, приводятся результаты наблюдений, полученных в сентябре 2017 г.

Появление светорассеивающего слоя объясняется резонансным рассеянием в результате процессов довозбуждения возбуждённых ионов, попадающих в спектры излучения лазеров по схемам (Kramida et al., 2018):



Ширина спектров лазеров равна 0,025 и 0,04 нм для атомарных ионов кислорода и азота. Линия азота попадает в спектр стандартного твердотельного лазера с рабочей длиной волны 532 нм. В сигналах обратного рассеяния на высотах 200–300 км эта линия обнаружена в 2008 г. (Бычков, Шевцов, 2012). Линия кислорода выбрана целенаправленно из условия максимизации энергии импульса лазера на красителе.

Состояние нижнего уровня переходов (1) возбуждённое. Время их жизни очень мало, одного порядка с длительностью импульса лазеров, и составляет 1 нс для иона кислорода и 13 нс для иона азота (Бычков, 2024; Vuchkov, 2023). Поэтому в ночное время на высотах ионосферы они появляются в заметном количестве только при появлении процесса ионизации, высыпаний электронов. Поглощение излучения лазеров происходит на длинах волн, близких к 561,106 и 532,095 нм. Сигнал резонансного рассеяния формируется при обратном спонтанном переходе в состояние нижнего уровня.

Механизм формирования резонансного рассеяния на возбуждённых ионах предложен в работе (Бычков, 2024). В исследовании сделан вывод о том, что сигнал резонансного рассеяния на возбуждённых ионах определяется появлением процессов ионизации нейтральных компонент основных атмосферных газов. Он практически не зависит от содержания этих ионов в основном состоянии, их влияние ничтожно мало. В работе (Vuchkov, 2023) показано, что условия для появления резонансного рассеяния на возбуждённых ионах атомов азота и кислорода сохраняются во всей области высот от 10 до 500 км. Возможные причины появления светорассеяния в термосфере в магнитоспокойное время обсуждаются в настоящей работе.

## Оборудование и методы измерений

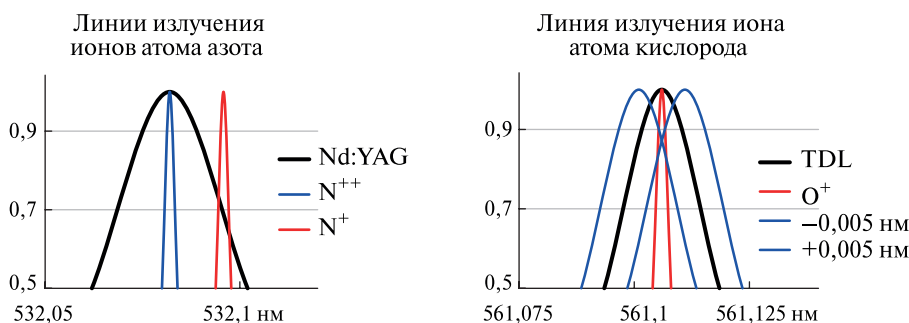
В наблюдениях 2017 г. использовался двухчастотный лидар с лазером Nd:YAG Brilliant-B (Quantel, Франция) для генерации излучения на длине волны 532 нм и лазер на красителе TDL-90 (Quantel, Франция) для генерации излучения на длине волны 561 нм с частотой следования импульсов 10 Гц. Основные параметры лидара, применённого в экспериментах, приведены в работе (Бычков, Середкин, 2020), схема лидара представлена в публикации (Бычков и др., 2020).

Для исключения засветок фотоэлектронных умножителей от сигналов ближней зоны в обоих приёмных каналах использовалось электронное запирающее фотоэлектронных умножителей импульсом длительностью 140 мкс. Это соответствует исключению данных на первых ~25 км. Полученные данные хранятся в виде бинарных файлов с 10-секундным накоплением, что позволяет производить дальнейшее суммирование за любые интервалы времени. Обычно они составляют 15 мин, в соответствии с режимом работы ионозонда. Измерения фонового сигнала начинались на 20-й мс после посылки каждого лазерного импульса в течение 4 мс с шагом 10 мкс. Измеренный таким образом фоновый сигнал не содержит импульсов последствия и обеспечивается хорошим накоплением данных.

Состояние ионосферы отслеживается по результатам вертикального зондирования ионозондом «Парус-А». Компьютеры, управляющие работой ионозонда и лидара, синхронизированы во времени по GPS (*англ.* Global Positioning System). Каждый сеанс зондирования ионосферы длится 20 с, начало сеанса — каждые 15 мин. Программа первичной обработки

лидарных данных удаляет сигналы, полученные во время работы ионозонда, для исключения возможных наводок на приёмную систему лидара.

На *рис. 1* показано расположение линий возбуждённых ионов в спектрах лазеров (Buchkov, 2023). Линии, представленные на *рис. 1*, построены с учётом ширины полосы лазерного излучения и доплеровского уширения линии на высотах ионосферы, равного  $\sim 0,004$  нм для температуры 800 К. Линия дважды ионизованного иона азота попадает в центр полосы излучения лазера, но содержание таких ионов мало. Основной вклад в лидарный сигнал вносят возбуждённые ионы  $N^+$ .

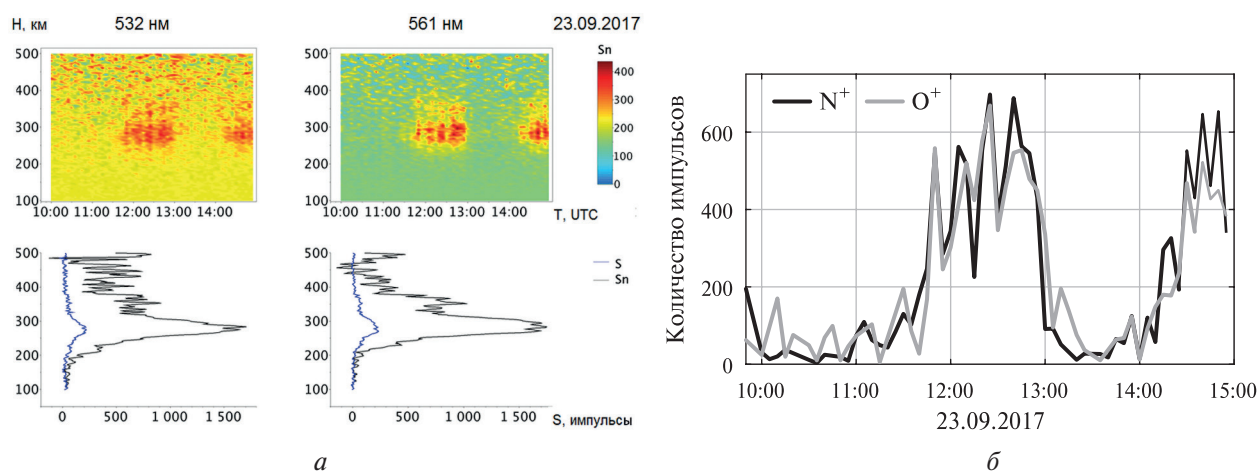


*Рис. 1.* Линии излучения возбуждённых ионов кислорода и азота в спектрах излучения лазеров Nd:YAG и TDL

Синие линии в правой панели *рис. 1* показывают сдвиг спектра излучения лазера относительно линии излучения ионов кислорода из-за возможной ошибки в калибровке лазера TDL. Предполагается, что длина волны лазера установлена с точностью до 0,01 нм.

### Экспериментальные данные

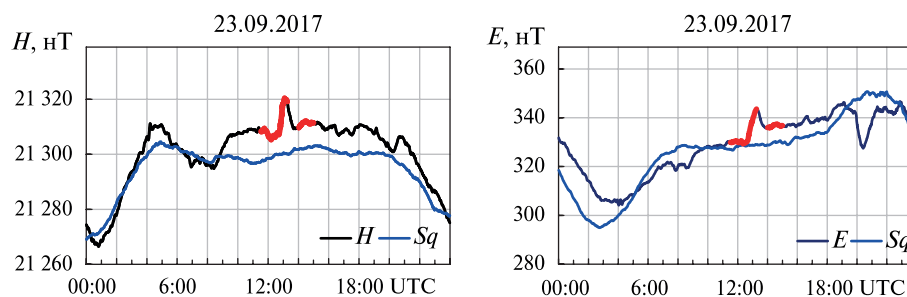
За период с августа по ноябрь 2017 г. было зарегистрировано семь случаев появления обратного рассеяния в термосфере на обоих лидарных каналах. Характерной особенностью данных, полученных за этот период, является рассеяние в области 200–400 км и его отсутствие на высотах 100–200 км. На *рис. 2а* представлено пространственно-временное распределение обратного сигнала, полученного 23 сентября 2017 г. по лидарным данным с 5-минутным накоплением. Фоновый сигнал вычтен. Профиль сглажен по высоте методом скользящего среднего с окном 4,5 км. Значения сигнала умножены на коэффициент  $kH^2$ , где  $H$  — высота (в км),  $k = 10^{-4}$ .



*Рис. 2.* Лидарный сигнал–фон в области 100–400 км (*а*) и тот же сигнал, суммированный в области 200–400 км (*б*), полученные 23 сентября 2017 г. Время UTC (*англ.* Coordinated Universal Time)

Суммарный лидарный сигнал  $S$ , накопленный за ночь, и тот же сигнал  $Sn$ , нормированный на коэффициент  $kH^2$ , представлены в нижней части *рис. 2а*. Нормировка на квадрат высоты  $H^2$  соответствует фактическому уменьшению принятого сигнала с увеличением высоты. Предполагается, что аэрозольное и молекулярное рассеяние отсутствует на высотах больше 100 км. При выбранном значении коэффициента  $k = 10^{-4}$  на высоте 100 км сигнал совпадает с фактически зарегистрированным сигналом, улучшая тем самым визуальное восприятие данных. На *рис. 2б* приведены лидарные сигналы на длинах волн 532 и 561 нм, накопленные за 5 мин и суммированные по области 200–400 км. Интервал времени между локальными максимумами сигнала светорассеивающего слоя составляет ровно 15 мин при первом его появлении и 10 мин во втором, с 14:10 до 15:00 UTC.

По данным магнитной обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН в магнитном поле (МП) наблюдались аномалии (03:00–6:00 и 13:00–14:00 UTC), *рис. 3*. Время появления резонансного рассеяния отмечено красным. Вариация  $Sq$  вычислялась как среднее за 5 самых спокойных дней среди 30 предшествовавших. Аномалии МП обсуждаются в следующих разделах.



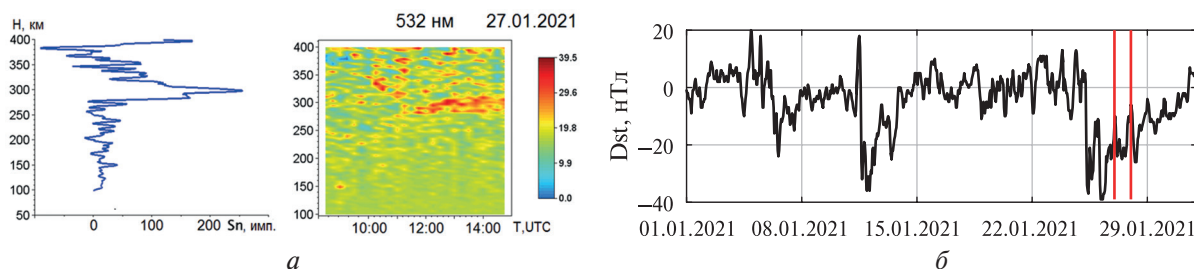
*Рис. 3.* Горизонтальная (H) и восточная (E) компонента МП 23 сентября 2017 г. Sq — спокойная суточная вариация

Другие появления светорассеяния в ионосфере, полученные в августе–ноябре 2017 г., в визуальном представлении подобны. Слой всегда появлялся на тех же высотах и интенсивностью свечения того же порядка. Два отдельных события зарегистрировано 23 сентября, в остальные дни наблюдалась сплошная полоса повышенного светорассеяния в области высот 200–400 км. Слои появлялись в 10:00–12:00 UTC и наблюдались до окончания работы лидара. Во всех случаях, за исключением первого, 3 августа 2017 г., МП было спокойным. По данным магнитной обсерватории «Паратунка» в дни появления резонансного рассеяния 28 августа, 5 и 23 сентября локальные 3-часовые  $K$ -индексы были равны (2 1 1 0 1 2 2 1), (2 3 2 2 2 1 2 1) и (1 1 1 0 2 1 2 1) соответственно. Жирным шрифтом отмечены значения во время лидарных наблюдений.

Появление светорассеивающих слоёв во всех случаях сопровождалось высыпаниями электронов в атмосферу. Это подтверждалось появлением F-рассеяния на ионограммах, ростом на 0,1–0,3 МГц значений  $foF2$  — критической частоты слоя F2 в ночных условиях, данными прямыми измерениями потоков электронов на европейских метеорологических спутниках MetOp-A, MetOp-B, пролетающих восточнее, и на следующем витке западнее Камчатки, во время лидарных наблюдений (Vyshkov et al., 2020). В работе (Бычков, Середкин, 2020) показано, что наблюдавшийся профиль лидарного сигнала на высотах 200–400 км формируется высыпанием в ионосферу моноэнергетического потока электронов с энергией около ~330 эВ. Наличие максимумов на профилях отношения рассеяния в области 60–100 км, синхронно со светорассеянием в ионосфере, позволяет сделать вывод о высыпаниях электронов с энергией в интервале 100–600 кэВ (Бычков и др., 2020).

Лидарные наблюдения проводятся на Камчатке с 2008 г., регулярно при наличии хорошей погоды. Визуально подобные светорассеивающие слои на тех же высотах были зарегистрированы только в январе–феврале 2021–2022 гг. Наблюдения проводились на твердотельном

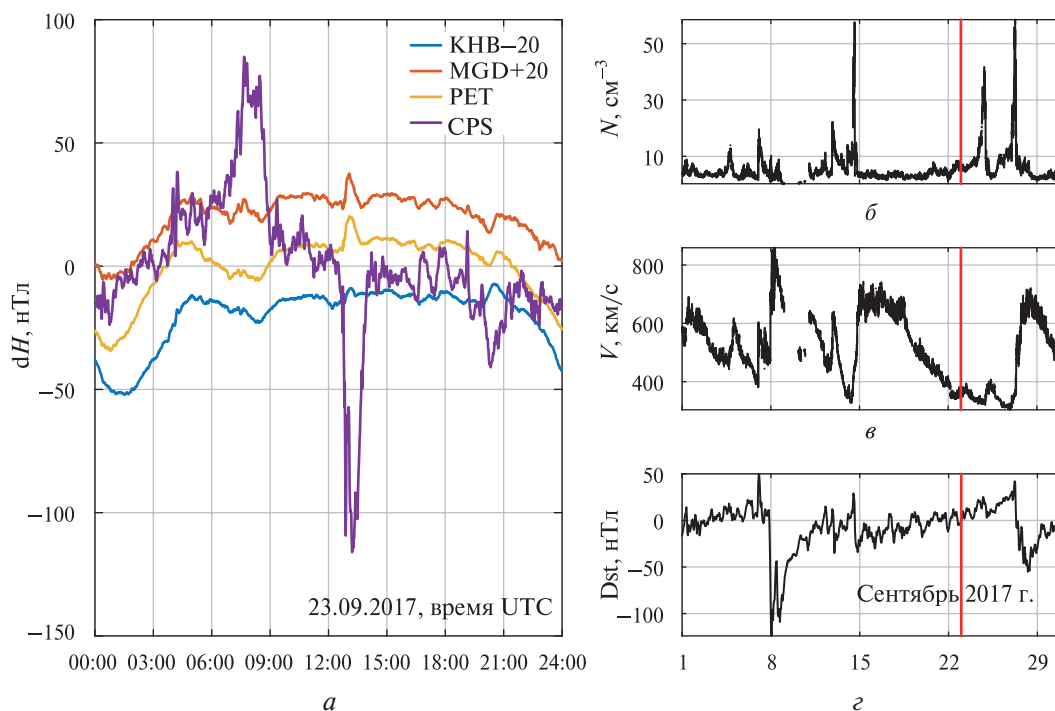
лазере с длиной волны 532 нм. На *рис. 4* приводятся результаты наблюдений 27 января 2021 г. Использованы лидарные данные с накоплением 15 мин. Обозначения те же, что на *рис. 2*.



*Рис. 4.* Лидарный сигнал–фон  $S_n$  в области 50–400 км, полученный 27.01.2021 (*a*), и значения Dst-индекса в январе 2021 г. (*б*). Красными линиями на *рис. 4б* выделено 27.01.2021

Интенсивность наблюдавшихся зимних светорассеивающих слоёв во всех случаях была на порядок меньше, чем осенью 2017 г. Такие слои всегда появлялись на фазе восстановления магнитосферы после геомагнитных возмущений и могут быть объяснены (Vuchkov et al., 2021). Усиление электрического поля поперёк хвоста магнитосферы во время возмущений означает увеличение скорости дрейфа плазмы из хвоста магнитосферы к Земле. Дрейф в неоднородном МП формирует кольцевой ток на расстояниях 10–60 тыс. км,  $\sim(2-9)R_E$ . Такой ток индуцирует магнитное поле, направленное противоположно геомагнитному полю. При распаде кольцевого тока и восстановлении геомагнитного поля может происходить захват электронов и их высыпание в атмосферу в процессе восстановления МП. Совпадение энергии высыпавшихся электронов в 2017 г. и 2021–2022 гг. указывает, что этот процесс контролируется магнитным полем Земли.

### Вариации в магнитном поле. Экспериментальные данные

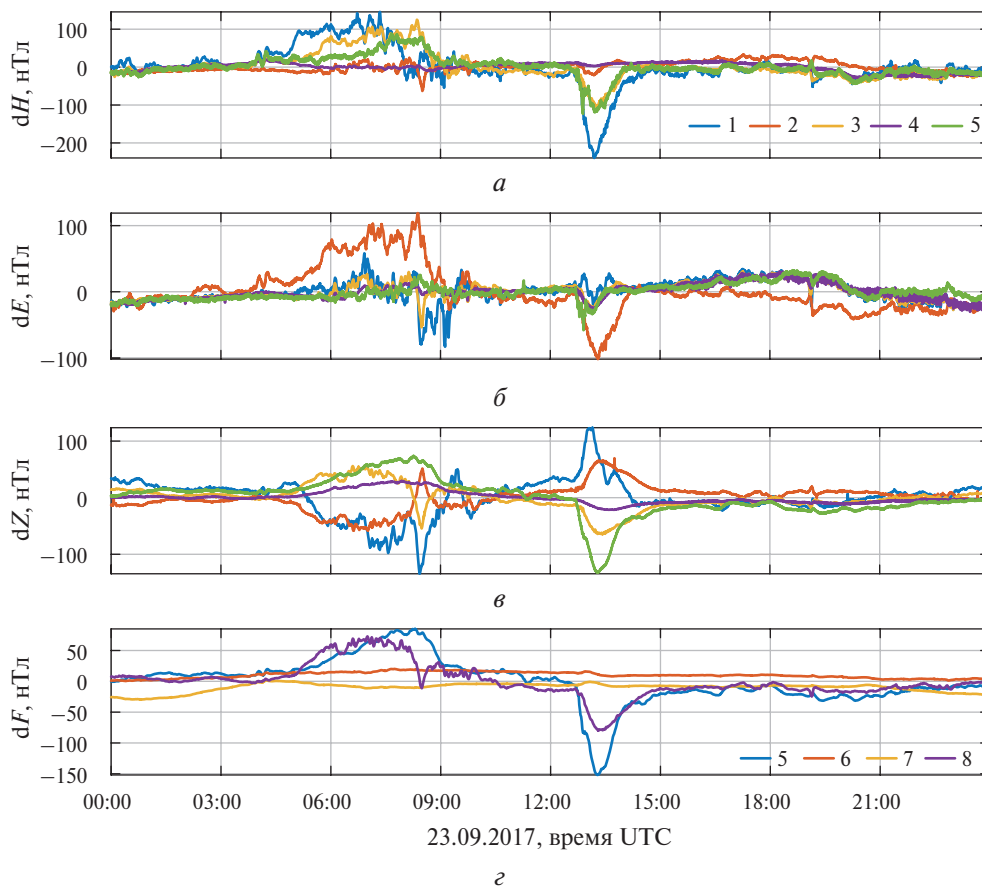


*Рис. 5.* Вариация горизонтальной компоненты МП 23.09.2017 (*a*), плотность (*б*) и скорость (*в*) плазмы солнечного ветра и Dst-индекс (*г*) в сентябре 2017 г. КНВ — Хабаровск, РЕТ — Паратунка, МGD — Магадан, CPS — Мыс Шмидта (кривые смещены для наглядности). Красными линиями на *рис. 5б–г* выделено время появления резонансного рассеяния

На *рис. 5а* (см. с. 374) показаны вариации горизонтальной составляющей магнитного поля, полученные по измерениям на обсерваториях ИКИР ДВО РАН «Магадан» (пос. Стекольный, Магаданская обл.), «Паратунка» (Камчатский край), «Хабаровск» (пос. Забайкальский, Хабаровский край) и «Мыс Шмидта» (Чукотка). На *рис. 5* представлены часовые значения плотности  $N$  (см. *рис. 5б*) и скорости  $V$  (см. *рис. 5в*) плазмы солнечного ветра (база данных OMNI, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>) и Dst-индекса (см. *рис. 5г*) ([https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html)).

Согласно *рис. 5*, Dst-индекс и содержание плазмы в солнечном ветре сохраняли близкие к нулю значения как 23.09.2017, так и в предшествующие 10 и 7 дней соответственно. Рост скорости солнечного ветра до  $\sim 650$  км/с 15–18 сентября на Dst-индекс не влиял. Геомагнитное возмущение происходит при взаимодействии МП магнитосферы Земли с межпланетным МП и зависит от его величины и направления, содержания захваченной плазмы. Отсюда следует, что изменения в МП (см. *рис. 5а*) не связаны с изменением геофизических условий.

По датам регистрации слоёв с резонансным рассеянием данные МП по станциям Аляски в основном отсутствуют. Данные за 23 сентября 2017 г. по четырём станциям в открытом доступе имелись. На *рис. 6* представлены вариации Н-, Е- и вертикальной (Z) составляющей и модуля  $F$  МП по станциям Аляски и Дальнего Востока России.



*Рис. 6.* Вариации горизонтальной (*а*), восточной (*б*) и вертикальной (*в*) составляющей МП и модуля  $F$  (*г*) МП по данным станций Аляски и Дальнего Востока России 23.09.2017. 1 — Toolik, 2 — Fort Yukon, 3 — Poker Flat, 4 — Kenai, 5 — Мыс Шмидта, 6 — Магадан, 7 — Паратунка, 8 — College

В *таблице* приведены геомагнитные координаты этих станций, рассчитанные по географическим координатам на <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html>, на *рис. 7* (см. с. 376) представлена карта обсерваторий. На *рис. 2б* области повышенного светорассея-

ния имеют правильную периодичность. Такой режим обычно использовался в работе станда «Сура» в Нижегородской обл. (Фролов, 2015). Магнитные данные станции Gakona, где расположен известный комплекс HAARP (англ. High-frequency Active Auroral Research Program), отсутствуют.

Координаты геомагнитных обсерваторий

Станции	Геомагнитные координаты, град		Географические координаты, град	
	с. ш.	з. д.	с. ш.	долгота
Toolik Lake	68,6	101,6	68,6	149,6° з. д.
Fort Yukon	67,5	95,2	66,6	145,2° з. д.
Poker Flat	65,8	95,7	65,1	147,4° з. д.
College	65,5	96,0	64,9	147,9° з. д.
«Мыс Шмидта»	64,4	126,7	68,9	179,4° з. д.
Gakona	63,6	91,1	62,4	145,1° з. д.
Kenai	60,9	95,8	60,6	151,3° з. д.
«Магадан»	52,0	145,4	59,6	150,8° в. д.
«Паратунка»	46,2	137,3	53,0	158,3° в. д.
«Хабаровск»	38,8	156,5	47,6	134,7° в. д.

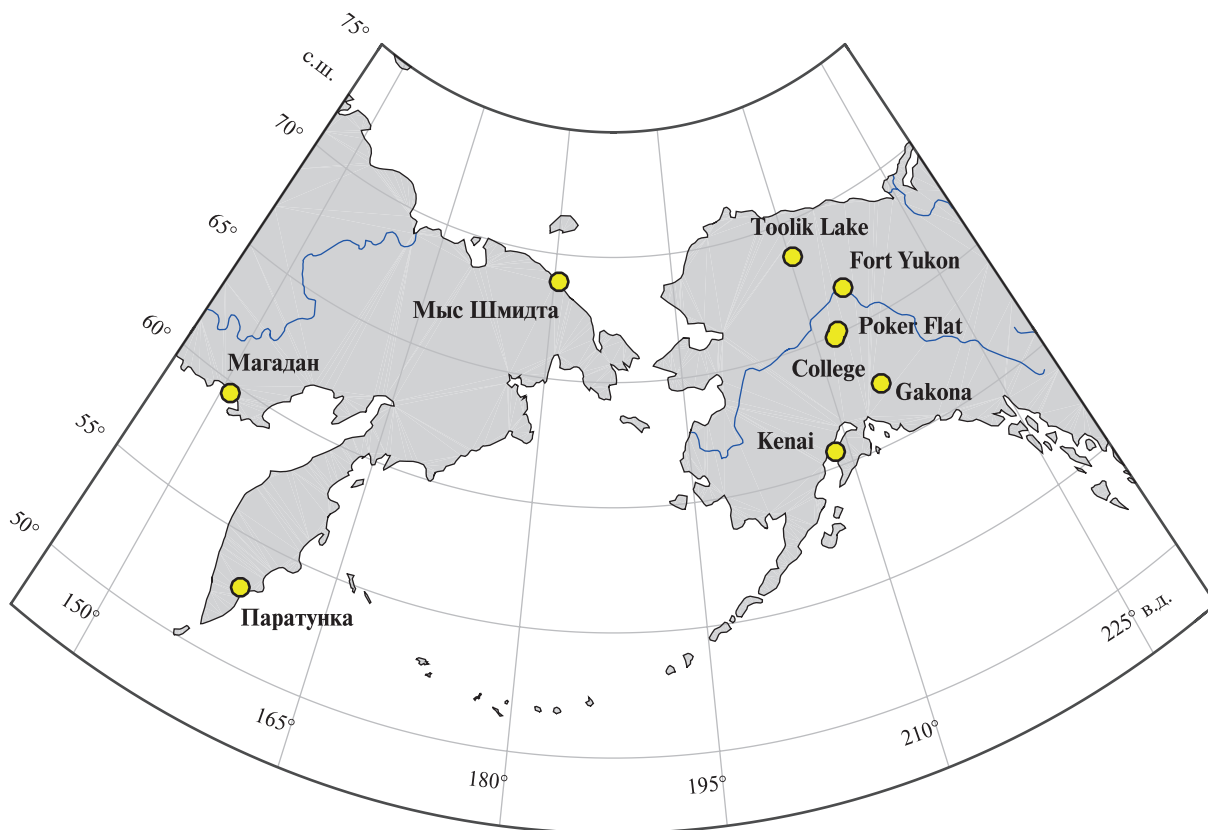


Рис. 7. Карта расположения геомагнитных обсерваторий Аляски и Дальневосточного региона России

**Первая аномалия** (см. рис. 6) в МП на Аляске 23.09.2017 началась в ~05:00 UTC, после захода Солнца в ~21:00 местного времени (на Камчатке местное время 17:00). В течение ~3–4 ч наблюдалась аномалия Н-компоненты МП с возрастанием до ~150 нТл (Toolik Lake),

до  $\sim 75$  нТл (Poker Flat и «Мыс Шмидта»). На Fort Yukon зарегистрировано небольшое увеличение Н-компоненты и аномально большое, на фоне вариаций на других пунктах Аляски, увеличение Е-компоненты (магнитного склонения) до  $\sim 100$  нТл. Короткопериодные вариации Н-компоненты во время этой аномалии отмечены на двух самых северных пунктах Аляски.

Таких же продолжительных вариаций Е-компоненты, как на Fort Yukon, на других станциях выделить нельзя. Можно отметить её небольшое плавное возрастание до  $\sim 50$  нТл на Toolik Lake и до  $\sim 25$  нТл на Poker Flat и плавное восстановление значений. Короткопериодные вариации Е-компоненты в конце этой аномалии отмечены на всех пунктах Аляски, кроме Kenai. Это самая южная и западная из рассматриваемых станций на Аляске. На Мысе Шмидта существенных изменений восточной компоненты не отмечено.

Вертикальная Z-компонента демонстрирует разнонаправленное изменение и в значительной степени определяется изменением модуля полного вектора напряжённости поля  $F$ . Вариации модуля  $F$  для станций College, «Магадан», «Паратунка» и «Мыс Шмидта» приведены на *рис. 6г*. Станция College расположена рядом со станцией Poker Flat, является обсерваторией сети INTERMAGNET и измеряет полные значения составляющих вектора, что позволяет рассчитать его модуль  $F$ . Можно отметить аномально большое для магнитоспокойных условий увеличение напряжённости поля на Мысе Шмидта и Аляске, небольшое её ослабление в районе Паратунки и отсутствие заметных изменений в Магадане. Изменения  $F$  начались в  $\sim 05:00$  UTC, восстановление МП завершилось к  $10:00$  UTC. Аномалия значений  $F$  на Мысе Шмидта запаздывала относительно College на  $\sim 20$  мин на фазе роста, и на  $\sim 40$  мин при восстановлении.

Наиболее важной для нас особенностью первой аномалии в МП Аляски является воздействие на МП Toolik Lake с севера ( $70^\circ$  с. ш.) и на МП Fort Yukon с запада ( $95^\circ$  з. д.) в геомагнитных координатах.

**Во время второй аномалии** в МП на обсерваториях Аляски и на Мысе Шмидта ( $12:00$ – $15:00$  UTC, см. *рис. 6*) отмечено синхронное резкое уменьшение Н- и Е-компоненты на всех пунктах наблюдений в  $12:45$  UTC, примерно совпадающее со временем начала резкого роста этих компонент на Камчатке (см. *рис. 3*). По данным станции Fort Yukon вариация Е-компоненты была максимальна по амплитуде (при минимальной вариации Н-компоненты).

На обсерватории «Паратунка» в Н-компоненте МП с  $11:30$  UTC наблюдалось небольшое уменьшение на  $\sim 5$  нТл (см. *рис. 3*). В  $12:15$  UTC начался её рост, в  $12:45$  — резкий рост (на  $\sim 15$  нТл), продолжавшийся до  $13:15$  UTC. Восстановление Н-компоненты продолжалось те же 30 мин, до  $13:45$ . С началом восстановления МП высыпания электронов прекратились. Восточная Е-компонента МП менялась синхронно и подобным образом (см. *рис. 3*). Во второй аномалии важным для нас индикатором будет воздействие на МП Kenai ( $61^\circ$  с. ш.,  $95,5^\circ$  з. д.) с юга и востока.

## Обсуждение результатов

Вариации компонент геомагнитного поля на *рис. 6* могут быть объяснены, например, нагревом и расширением области с замагниченной плазмой. Замагниченность означает, что поток магнитного поля через произвольный замкнутый контур, связанный с плазмой, сохраняется. В ионосфере Земли МП «вморожено» в плазму на высотах больше  $140$  км, там циклотронная частота электронов и ионов становится больше частот соударений с нейтрами. Выше  $130$  км (турбопауза) коэффициент вязкости среды становится мал. Турбулентные процессы локализуются в области непосредственного воздействия радиоволн. Расширение нагретой области происходит в среде с такой же плазмой, преодолевая давление МП среды и вызывая в ней аномальные деформации. Эти деформации могут распространяться на значительные расстояния, пока не установится равновесное давление МП.

Стенд HAARP состоит из  $180$  излучающих элементов ( $12$  рядов по  $15$  антенн в каждом) с диаграммой направленности  $4,5 \times 15^\circ$ , излучающие диполи образуют фазированную антенную

решётку (Мурлага, 2014). На высоте 300 км засвеченная область  $\sim 25 \times 80$  км. Прямоугольное антенное поле таких стенов ориентировано широкой стороной под прямым углом к направлению на север. Нагрев ионосферы можно проводить либо на север, либо на юг настройкой фазированной антенной решётки. Направление излучения регулируется назначением амплитуды и начальной фазы напряжения для каждого излучающего элемента.

Наиболее удобной для анализа особенностью первой аномалии в МП Аляски представляются результаты воздействия на МП Toolik Lake ( $69^\circ$  с. ш.,  $101^\circ$  з. д.) почти точно с севера и на МП Fort Yukon ( $68^\circ$  с. ш.,  $95^\circ$  з. д.) с запада. Во второй аномалии таким индикатором будет воздействие на МП Kenai ( $61^\circ$  с. ш.,  $95^\circ$  з. д.) с юга и востока (см. *рис. 6а, б*).

Географическая долгота Gakona  $145^\circ$  з. д. — точка с координатами  $71^\circ$  с. ш.,  $145^\circ$  з. д. — находится в  $\sim 800$  км севернее Gakona. Её геомагнитные координаты —  $71,45^\circ$  с. ш.,  $100,88^\circ$  з. д. Геомагнитная долгота этой точки почти точно совпадает с долготой Toolik Lake. Техническая возможность нагревать ионосферу «почти точно с севера» от Toolik Lake географией обеспечивается. Возможность нагрева ионосферы с юга сомнений не вызывает. Направление изучения к югу было выбрано таким, что МП области нагрева проецировалось на территорию южнее Kenai.

Предположение о нагреве ионосферы позволяет объяснить все особенности в аномалиях МП. Становятся понятными запаздывания Н-компоненты на Poker Flat и «Мыс Шмидта», в связи с ростом расстояния от области нагрева, и отсутствие вариаций Н-компоненты на Fort Yukon и Kenai в первой аномалии. «Нагретая» область легче расширяется на север, чем на юг, так как Н-компонента МП возрастает с севера на юг. В вариациях Е-компоненты можно объяснить появление аномалий на Poker Flat и Toolik Lake только в середине процесса. На начальной стадии нарастание вариации МП происходило за счёт северной компоненты. Но когда давление МП с юга и запада стало превышать давление с востока, начался рост Е-компоненты. Выбранная на севере точка центра засвеченной области в ионосфере оказалась немного западнее Toolik Lake.

Во второй аномалии уменьшение Е-компоненты МП на Kenai уточняет долготу эпицентра возмущений — между Fort Yukon и Kenai. Это Gakona. С этой точки можно нагревать ионосферу как от «севернее Toolik Lake», так и от «южнее Kenai». Вариации модуля  $F$  на College означают усиление МП во время первой и ослабление его во время второй аномалии. Это соответствует предложенному объяснению о причинах их появления.

## Высыпания электронов

Как уже отмечалось, с августа по начало ноября 2017 г. на среднеширотной лидарной станции Камчатки зарегистрировано семь случаев появления резонансного рассеяния на высотах 200–400 км. Во всех случаях, кроме первого, 03.08.2017, слои повышенного светорассеяния появлялись в спокойных геомагнитных условиях и никогда не регистрировались ранее, начиная с осени 2007 г. Появление таких ночных слоёв объясняется высыпанием моноэнергетических потоков электронов с энергией  $\sim 330$  эВ (Бычков, Середкин, 2020). В слое F2 ионосферы отмечалось F-рассеяние, синхронное с появлением светорассеяния. В разных случаях диффузность следа слоя F2 на ионограммах менялась от слабой до полного смещения О- и Х-следов слоя F2. Анализ всех этих случаев выходит за рамки настоящего исследования и требует отдельной работы.

При исследовании лидарных данных средней атмосферы обнаружено появление слоёв повышенного светорассеяния на высотах от 60 до 90 км. Светорассеяние на длинах волн 532 и 561 нм резонансное, на возбуждённых ионах атомов азота и кислорода. Появление его на этих высотах ночью возможно во время высыпаний электронов с энергией 100–600 кэВ (Бычков и др., 2020).

На графиках *рис. 3* красным цветом выделено время появления высыпаний электронов в ионосферу 23.09.2017. Высыпания электронов, зарегистрированные с 11:30 UTC, начались раньше появления аномального роста обеих компонент МП в 12:45 UTC. С 14:10 UTC они

возобновились и продолжались до конца лидарных измерений в 15:00 UTC при отсутствии заметных вариаций МП. В обычных условиях вариации МП на  $\sim 15$  нТл, подобные зарегистрированным в этот день, слишком малы, чтобы вызывать заметные высыпания электронов. Красные линии на *рис. 3* должны быть прерывистыми, включать участки с отсутствием высыпаний, как на *рис. 2a*. Отсюда следует, что высыпания электронов вызваны не только изменениями МП, но и каким-то другим процессом-катализатором.

Высыпания электронов из радиационного пояса (РП) Земли при нагреве ионосферы стендом «Сура» исследовались в течение многих лет. Для контроля за состоянием ионосферы использовалась сеть ионозондов в г. Нижнем Новгороде, Москве, г. Харькове (Украина) и г. Прухонице (Чехия). Удалённость средств диагностики от стенда «Сура» составляла от 560 до 2200 км. При необходимости использовались ионозонды в других пунктах, а также радар некогерентного рассеяния г. Харькова. Регистрировались повышения критической частоты слоя F2 и минимальной частоты отражения  $f_{\min}$ . Отмечалось также появление перемещающихся ионосферных возмущений, связанных с работой стенда (Фролов и др., 2019; Черногор, Фролов, 2012).

На Камчатке в лидарных исследованиях обнаружены высыпания электронов из РП Земли. Резонансное рассеяние происходит на «новорождённых» ионах азота и кислорода, появившихся в возбуждённых состояниях при ионизации нейтральных компонент атмосферы. В процессе релаксации к основному состоянию они проходят через состояния потенциальной «мишени» для фотонов с временами жизни 13 и 1 нс. Механизм воздействия нагрева ионосферы на Аляске на появление высыпания электронов в ионосферу Камчатки неясен.

В работе (Черногор, Фролов, 2012) показано, что периодический нагрев ионосферы с перерывами на её восстановление может генерировать перемещающиеся ионосферные возмущения с периодом режима нагрева. Но от расположения стенда «Сура» до г. Харькова они проходят за 50 мин. Высыпания электронов на Камчатке начинаются практически одновременно с изменениями МП на Аляске. В этом отношении механизм генерации высыпаний похож на появление волн очень низкой частоты (1–30 кГц), меняющих питч-угловое распределение электронов РП. Но волны очень низкой частоты генерируются в ионосфере, непосредственно засвеченной мощными короткими радиоволнами. И они распространяются вдоль силовых линий МП. На Камчатку такие волны могут приходиться из сопряжённой по МП области Австралии.

Как уже отмечалось, высыпания электронов из РП регистрировались на Камчатке зимой 2021–2022 гг. (см. *рис. 4*) во время возмущений МП на фазе его восстановления. В работе (Фролов и др., 2019) отмечено, что высыпаний в зоне нагрева ионосферы не происходит, если эксперименту предшествовали 10 или более спокойных дней. Это означает, что высыпания электронов продолжаются и после восстановления МП. Любая вариация МП вызывает изменение питч-углового распределения электронов и высыпание части их в ионосферу до тех пор, пока не закончатся «нестабильные» электроны с питч-углом, близким к углу конуса потерь. Именно такие условия наблюдались 23.09.2017 (см. *рис. 5б–г*). Во время первой аномалии происходило пополнение РП нестабильными электронами. Сжатие МП на Аляске (ослабление на Камчатке) с последующим естественным восстановлением имитирует геомагнитное возмущение. Во время второй аномалии ослабление МП на Камчатке должно привести к усилению интенсивности высыпаний.

В 2021 г. комплекс HAARP передан Геофизическому институту Университета Аляски (*англ.* Geophysical Institute of the University of Alaska Fairbanks — GI UAF), и информации о работе HAARP до 2021 г. на сайте института нет.

## Заключение и выводы

Проведён анализ динамики геомагнитного поля Земли по результатам измерений 23.09.2017 на девяти станциях: пяти на Аляске и четырёх в Дальневосточном регионе России. Сравнительный анализ аномальных вариаций МП позволил сделать вывод о том, что эпицентр,

из которого распространяются возмущения МП, локализован на Аляске. Эти эпицентры расположены на одном географическом меридиане с Гакона. Показано, что вариации МП могли происходить при нагреве ионосферы стендом HAARP. Светорассеивающие слои на высотах 200–400 км вызваны высыпаниями электронов из РП Земли и появлялись в магнитоспокойных условиях.

Можно сделать выводы:

- вариации МП на Аляске аномальны и могут быть объяснены расширением плазмы в результате нагрева ионосферы стендом HAARP;
- аномалии МП на Камчатке являются прямым следствием аномалий МП на Аляске. Они невелики и не могут быть единственной причиной, вызывающей высыпания электронов, но обеспечивали пополнение РП нестабильными электронами;
- высыпания электронов из РП на Камчатке начались одновременно с изменениями МП на Аляске и заметно раньше начала роста компонент МП на Камчатке. В 14:10 UTC высыпания возобновились при отсутствии аномалий в МП. Высыпания управлялись другим процессом-катализатором;
- информации о работе стенда HAARP 23.09.2017 нет. Процесс, вызвавший высыпания, до конца не ясен.

Высыпания электронов из РП на Камчатке наблюдались редко и только зимой, на фазе восстановления магнитосферы после геомагнитных возмущений.

Выражаем признательность доктору физико-математических наук Фролову Владимиру Леонтьевичу (Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (НИРФИ ННГУ)) за консультации и внимание к работе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2). Использовано оборудование Центра коллективного пользования ИКИР ДВО РАН «Северо-восточный гелиогеофизический центр», ЦКП 558279, УНУ 351757.

Авторы выражают благодарность сотрудникам GI UAF, <https://www.gi.alaska.edu>, за предоставление доступа к магнитным данным, полученным на станциях Аляски, и сотрудникам обсерваторий ИКИР ДВО РАН за обеспечение регулярного магнитного мониторинга.

## Литература

1. Бычков В. В. Формирование резонансного рассеяния на возбуждённых ионах атомов кислорода и азота в лидарных исследованиях атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 263–274. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-263-274.
2. Бычков В. В., Середкин И. Н. Резонансное рассеяние в термосфере как индикатор высыпаний сверхтепловых электронов // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 774–781. DOI: 10.15372/AOO20201005.
3. Бычков В. В., Шевцов Б. М. Динамика лидарных отражений верхней атмосферы Камчатки и ее связь с явлениями в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 6. С. 837–844.
4. Бычков В. В., Середкин И. Н., Маричев В. Н. Рассеяние на возбужденных ионах как причина регистрации мнимого аэрозоля в средней атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 11. С. 867–873. DOI: 10.15372/AOO20201107.
5. Костко О. К. Использование лазерной локации в исследованиях атмосферы (обзор) // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. № 10. С. 2133–2162.
6. Мурлага А. Р. Определение основных характеристик стенда HAARP, подлежащих мониторингу со спутника // Электрон. журн. «Труды МАИ». 2014. № 76. 13 с.
7. Фролов В. Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ-радиоволнами: Обзор результатов экспериментальных исследований // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1. № 2. С. 22–48. DOI: 10.12737/10383.
8. Фролов В. Л., Акчурина А. Д., Болотин И. А., Рябов А. О., Бертьель Ж.-Ж., Парро М. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 9. С. 641–663.

9. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Известия вузов. Радиоп физика. 2012. Т. 55. № 1–2. С. 14–35.
10. Bychkov V. Resonant scattering by excited gaseous components as an indicator of ionization processes in the atmosphere // Atmosphere. 2023. V. 14. Iss. 2. Article 271. DOI: 10.3390/atmos14020271.
11. Bychkov V., Seredkin I., Smirnov S. On the mechanism of formation of a resonant backscattering signal in the middle atmosphere // Proc. SPIE. 26<sup>th</sup> Intern. Symp. on Atmosphere and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2020. V. 11560. Article 115608Y. DOI: 10.1117/12.2575711.
12. Bychkov V. V., Seredkin I. N., Dmitriev A. V. Resonance scattering as possible reason for detection of imaginary aerosol formations in the upper mesosphere // Proc. SPIE. 27<sup>th</sup> Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. Article 119168H. DOI: 10.1117/12.2603898.
13. Collins R. L., Hallinan T. J., Smith R. W., Hernandez G. Lidar observations of a large high-altitude sporadic Na layer during active aurora // Geophysical Research Letters. 1996. V. 23. Iss. 24. P. 3655–3658. DOI: 10.1029/96GL03337.
14. Collins R. L., Lummerzheim D., Smith R. W. Analysis of lidar systems for profiling aurorally excited molecular species // Applied Optics. 1997. V. 36. P. 6024–6034. DOI: 10.1364/AO.36.006024.
15. Collins R. L., Su L., Lummerzheim D., Doe R. A. Investigating the auroral thermosphere with N<sub>2</sub><sup>+</sup> lidar // Characterising the Ionosphere. Meeting Proc. RTO-MP-IST-056. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2006. P. 2-1–2-14.
16. Collins R. L., Li J., Martus C. M. First lidar observation of the mesospheric nickel layer // Geophysical Research Letters. 2015. V. 42. Iss. 2. P. 665–671. DOI: 10.1002/2014GL062716.
17. Kawahara T. D., Nozawa S., Saito N. et al. Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd:YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6°N, 19.2°E) // Optics Express. 2017. V. 25. P. A491–A501. DOI: 10.1364/OE.25.00A491.
18. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (version 5.5.2). Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2018.
19. Tsuda T. T., Nozawa S., Kawahara T. D. et al. Decrease in sodium density observed during auroral particle precipitation over Tromsø, Norway // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. Iss. 17. P. 4486–4490. DOI: 10.1002/grl.50897.

## On the causes of resonant scattering by excited ions of atmospheric gas components

V. V. Bychkov, S. Yu. Khomutov

*Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS  
Paratunka, Kamchatka Krai 684034, Russia  
E-mail: vasily.v.bychkov@gmail.com*

The results of analysis of atmosphere lidar sounding data in the altitude range of 25–500 km obtained at the lidar station of the Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS (Kamchatka, 53° N, 158° E) are discussed. The recorded light scattering in the ionosphere is caused by the appearance of ionization process. At night, these are precipitations of electron fluxes. An analysis of the geophysical conditions during precipitation of electrons into the atmosphere in autumn 2017 and winter 2021–2022 is presented. Variations in the geomagnetic field components for 23.09.2017 are studied using the data from Russian Far Eastern and Alaskan observatories. During the quiet diurnal variation of the magnetic field (MF), two anomalies are detected — in the early morning and then in the daytime UTC. It is shown that the epicenter of the anomalies is located in Alaska. The variation features in the horizontal and eastern components of the Alaska MF make it possible to define the location of the epicenters of the anomalies. During the first anomaly, the epicenter was located north of all the observatories and west of the easternmost one. During the second anomaly, it was located south of all the observatories and east of the westernmost one. The assumption is substantiated that magnetic field variations and electron precipitation could occur as a result of experiments on ionospheric heating.

**Keywords:** atmosphere, mesosphere, ionosphere, particle precipitation, lidar

Accepted: 05.03.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-370-382

## References

1. Bychkov V. V., Formation of resonant scattering on excited ions of oxygen and nitrogen atoms in lidar studies of the atmosphere, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 263–274 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-263-274.
2. Bychkov V. V., Seredkin I. N., Resonance scattering in the thermosphere as an indicator of superthermal electron precipitation, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021, V. 34, pp. 26–33, DOI: 10.1134/S1024856021010048.
3. Bychkov V. V., Shevtsov B. M., Dynamics of lidar reflections of the Kamchatka upper atmosphere and its connection with phenomena in the ionosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, V. 52, pp. 797–804, DOI: 10.1134/S0016793212060047.
4. Bychkov V. V., Seredkin I. N., Marichev V. N., Scattering on excited ions as a reason for detecting imaginary aerosols in the middle atmosphere, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021, V. 34, pp. 104–110, DOI: 10.1134/S1024856021020032.
5. Kostko O. K., An application of laser location for atmospheric research (review article), *Soviet J. Quantum Electronics*, 1975, V. 5, No. 10, Article 1161, DOI: 10.1070/QE1975v005n10ABEH011998.
6. Murlaga A. R., Analysis of HAARP heating facility main features with satellite monitoring, *Trudy MAI*, 2014, No. 76, 13 p. (in Russian).
7. Frolov V. L., Spatial structure of plasma density perturbations, induced in the ionosphere modified by powerful HF radio waves: Review of experimental results, *Solar-Terrestrial Physics*, 2015, V. 1, No. 2, pp. 23–48 (in Russian), DOI: 10.12737/10383.
8. Frolov V. L., Akchurin A. D., Bolotin I. A., Ryabov A. O., Berthelier J. J., Parrot M., Precipitation of energetic electrons from the Earth's radiation belt stimulated by high-power HF radio waves for modification of the midlatitude ionosphere, *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2019, V. 62, No. 9, pp. 641–663 (in Russian).
9. Chernogor L. F., Frolov V. L., Moving ionospheric disturbances generated by periodic plasma heating by powerful high-frequency radio emission, *Izvestiya vuzov. Radiofizika*, 2012, V. 55, No. 1–2, pp. 14–35 (in Russian).
10. Bychkov V., Resonant scattering by excited gaseous components as an indicator of ionization processes in the atmosphere, *Atmosphere*, 2023, V. 14, Iss. 2, Article 271, DOI: 10.3390/atmos14020271.
11. Bychkov V., Seredkin I., Smirnov S., On the mechanism of formation of a resonant backscattering signal in the middle atmosphere, *Proc. SPIE. 26<sup>th</sup> Intern. Symp. on Atmosphere and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 2020, V. 11560, Article 115608Y, DOI: 10.1117/12.2575711.
12. Bychkov V. V., Seredkin I. N., Dmitriev A. V., Resonance scattering as possible reason for detection of imaginary aerosol formations in the upper mesosphere, *Proc. SPIE. 27<sup>th</sup> Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 2021, V. 11916, Article 119168H, DOI: 10.1117/12.2603898.
13. Collins R. L., Hallinan T. J., Smith R. W., Hernandez G., Lidar observations of a large high-altitude sporadic Na layer during active aurora, *Geophysical Research Letters*, 1996, V. 23, Iss. 24, pp. 3655–3658, DOI: 10.1029/96GL03337.
14. Collins R. L., Lummerzheim D., Smith R. W., Analysis of lidar systems for profiling aurorally excited molecular species, *Applied Optics*, 1997, V. 36, pp. 6024–6034, DOI: 10.1364/AO.36.006024.
15. Collins R. L., Su L., Lummerzheim D., Doe R. A., Investigating the auroral thermosphere with N<sub>2</sub><sup>+</sup> lidar, *Characterising the Ionosphere. Meeting Proc. RTO-MP-IST-056*, Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2006, pp. 2-1–2-14.
16. Collins R. L., Li J., Martus C. M., First lidar observation of the mesospheric nickel layer, *Geophysical Research Letters*, 2015, V. 42, Iss. 2, pp. 665–671, DOI: 10.1002/2014GL062716.
17. Kawahara T., Nozawa S., Saito N. et al., Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd:YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6° N, 19.2° E), *Optics Express*, 2017, V. 25, pp. A491–A501, DOI: 10.1364/OE.25.00A491.
18. Kramida A., Ralchenko Y., Reader J., NIST ASD Team, *NIST Atomic Spectra Database (version 5.5.2)*, Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology, 2018.
19. Tsuda T. T., Nozawa S., Kawahara T. D. et al., Decrease in sodium density observed during auroral particle precipitation over Tromsø, Norway, *Geophysical Research Letters*, 2013, V. 40, Iss. 17, pp. 4486–4490, DOI: 10.1002/grl.50897.