

## Многолетние вариации скоростей дрейфа ионизации над югом Восточной Сибири

М. А. Черниговская, Д. С. Хабитуев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*  
*E-mail: cher@iszf.irk.ru*

На основе статистического анализа большого массива архивных экспериментальных данных о динамическом режиме ионосферы над Иркутском получены статистические многолетние характеристики горизонтального дрейфа неоднородностей ионизации над регионом юга Восточной Сибири. Измерения проводились радиофизическим методом разнесённого приёма с малой базой отражённого от ионосферы радиосигнала при вертикальном наземном радиозондировании в 1958–1982 гг. Анализ данных многолетних измерений подтвердил явные различия в характере динамического режима нижней и верхней ионосферы. Показано, что движение ионизации в зональном направлении более регулярно, чем меридиональный дрейф. Определены характерные сезонные особенности вариаций величины и направления горизонтальных дрейфовых движений на высотах областей E и F ионосферы.

**Ключевые слова:** динамика ионосферы, метод разнесённого приёма, многолетние вариации, сезонные вариации, нижняя и верхняя ионосфера, статистический анализ данных

Одобрена к печати: 14.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-285-297

### Введение

Знание многолетних характеристик (годовых, сезонных, месячных, суточных) бывает крайне необходимо при корректном описании особенностей пространственно-временного распределения (типичного или аномального) любого геофизического параметра, характеризующего атмосферные процессы. А степень изменчивости анализируемого параметра оценивается как отклонение соответствующих величин для отдельных дней, месяцев, лет от средних многолетних величин, статистически полученных из многолетнего ряда однородных наблюдений в данном географическом регионе за длительный период времени. По решению Всемирной метеорологической организации (ВМО, *англ.* World Meteorological Organization — WMO) принято использовать 30-летний период для определения климатической нормы (средней многолетней величины) метеорологического параметра. Подобные оценки применимы и при анализе любых геофизических параметров.

Стандартное определение климата, связанное с некоторым средним состоянием и тенденцией метеорологических параметров в нижней атмосфере Земли до высоты тропопаузы, является очень узким. В настоящее время термины «метеорология» и «климатология» применяются не только к приземным слоям атмосферы, но и к средней и верхней атмосфере, включая ионосферу (Kazimirovsky et al., 2006). Системные междисциплинарные подходы к изучению изменчивости солнечно-земной среды приводят к пониманию краткосрочных (космическая погода) и долгосрочных (космический климат) изменений.

Важность изучения многолетних (или долговременных) трендов в солнечно-земной физике подчёркивается множеством исследований в этом направлении, информация о которых приводится в ряде обширных обзоров (Данилов, Константинова, 2020; Kazimirovsky et al., 2006; Laštovička, 2022; Rishbeth, 1997). Должно пройти несколько десятилетий, прежде чем реальность долгосрочных изменений будет полностью установлена. В обзоре (Rishbeth, 1997) автор предполагает четыре возможные причины долговременных изменений в ионосфере: 1) глобальное потепление в нижних слоях атмосферы, сопровождающееся похолоданием

в средних и верхних слоях атмосферы; 2) химическое загрязнение атмосферы по естественным (например, вулканическим) и техногенным причинам; 3) долгосрочные изменения солнечной активности; 4) вековые изменения геомагнитного поля.

Цель настоящей работы заключается в анализе многолетних вариаций скорости горизонтального дрейфа неоднородностей ионизации на высотах областей E и F на основе анализа огромного массива архивных экспериментальных данных, полученных методом разнесённого приёма радиосигнала (метод D1, по номенклатуре Международного научного радиосоюза (УРСИ, *англ.* Union Radio-Scientifique Internationale — URSI) тех лет) при вертикальном наземном радиозондировании вблизи г. Иркутска в 1958–1982 гг.

Исследование движения неоднородностей ионизации (другими словами, перемещающихся ионосферных возмущений — ПИВ) представляет огромную значимость и актуальность в физике атмосферы и ионосферы во все годы исследований по настоящее время. Особенно высок был интерес к данному направлению на заре исследований ионосферы (Поляков и др., 1968). В период получения экспериментальных данных, анализируемых в настоящей работе, активно проводилась их взаимная калибровка и сравнение с результатами экспериментальных измерений другими методами (ракетные пуски, радиолокация метеорных следов, фотографирование искусственных светящихся облаков, разнесённый приём сигналов внеземных источников), а также с модельными расчётами (Казимировский, Кокоуров, 1979 и цитируемая в монографии литература). Обобщение данных многолетних измерений ионосферных движений позволило сделать вывод о том, что в областях D и E ионосферы (примерно до высоты 120–130 км) скорость дрейфа неоднородностей ионизации, полученная методом D1, совпадает со скоростью нейтрального ветра на этих высотах. Для F-области надёжно установлено, что метод D1 даёт информацию только о дрейфовых движениях неоднородностей ионизации. отождествление этих движений со скоростью нейтрального ветра представляется некорректным. Полученные особенности метода D1 необходимо учитывать при физической интерпретации результатов экспериментальных измерений.

Однако важным приложением изучения динамики ионосферных неоднородностей в F-области становится возможность последующей модельной оценки скорости нейтрального ветра в исследуемой области ионосферы (Толстикова и др., 2022; Oinats et al., 2016; Shcherbakov et al., 2015).

## Данные экспериментальных измерений

Для анализа используются архивные наблюдательные данные о динамическом режиме ионосферы, полученные радиофизическим методом разнесённого приёма отражённого от ионосферы радиосигнала (метод D1) при вертикальном наземном радиозондировании, который даёт информацию о движении неоднородной ионизации.

Систематические измерения дрейфа неоднородностей ионизации в ионосфере были начаты с апреля 1958 г., фактически с первых дней существования Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН) (в те годы — Сибирский институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн) (Казимировский, Кокоуров, 1979; Петрухин, 2015). Наблюдения дрейфов на высотах областей E и F ионосферы велись на измерительном комплексе, который состоял из передающего пункта в пос. Зуй ( $52^{\circ}28' \text{ с. ш.}, 102^{\circ}04' \text{ в. д.}$ ; 30 км к северу от Иркутска), излучающего сигналы в коротковолновом диапазоне (рабочая частота 2,2 МГц), контрольно-измерительного центра и трёх разнесённых приёмных антенн, расположенных также в пос. Зуй. Параметры оборудования приведены в монографии (Казимировский, Кокоуров, 1979) и многочисленных ссылках в ней. Приёмные антенны параллельны друг другу и расположены в вершинах прямоугольного треугольника, катеты которого имеют длину 120 м (порядка длины радиоволны) и ориентированы в широтном и долготном направлении. Измерения проводились круглосуточно, продолжительность сеанса наблюдений — 5 мин. Для расчётов скорости дрейфа использовались радиотражения от областей E и E<sub>s</sub> — днём и от области F — ночью. Вектор скорости горизонтального дрейфа

ионизации рассчитывался по сдвигам записей временных вариаций  $R(t)$  амплитуды отражённых от ионосферы и зарегистрированных приёмниками сигналов с использованием метода подобных замираний (Казимировский, Кокоуров, 1979).

Измерения на данной экспериментальной установке выполнялись с апреля 1958 г. по ноябрь 1982 г. До сентября 1973 г. регистрация велась на киноплёнку, после проводилась цифровая запись на магнитофон. Полученные на установке в пос. Зуй экспериментальные данные были опубликованы в 1968–1984 гг. в 18 выпусках сборника «Результаты ионосферных наблюдений. Измерения горизонтальных дрейфов неоднородностей в ионосфере». Таблицы содержат дату и время измерения, модуль  $V$  (м/с) и азимут  $\Phi$  (град) вектора скорости дрейфа, а также зональную  $U$  и меридиональную  $V$  компоненты вектора скорости дрейфа.

Для статистического анализа использовался весь массив архивных экспериментальных данных почти за 25 лет с апреля 1958 г. по ноябрь 1982 г. Массив экспериментальных данных состоит из 29 585 измерений. Для осуществления анализа данные измерений ионосферного дрейфа были оцифрованы, создан архив данных скорости дрейфа на высотах ионосферы. Анализировалось распределение модуля  $V$  (м/с) и направления  $\Phi$  (град) вектора скорости горизонтального дрейфа, а также зональной  $U$  (+ на восток) и меридиональной  $V$  (+ на север) компонент вектора скорости дрейфа. Направление (азимут)  $\Phi$  скорости дрейфа отсчитывался по часовой стрелке от направления на север.

## Результаты анализа экспериментальных данных и их обсуждение

### Статистический анализ данных

*Рисунок 1а* (см. с. 288) показывает общую картину высотно-временного распределения азимута дрейфа неоднородностей ионизации в интервале высот 90–350 км. Распределение числа измерений по годам приведено на *рис. 1б, в*. До 1965 г. измерений было мало. В соответствии с общепринятыми в те годы международными программами координированных наблюдений (Международный геофизический год, 1957–1958 гг.; Международный год спокойного Солнца, 1964–1965 гг.) измерения проводились ежечасно 3–4 дня в месяц. С конца 1965 г., когда стало очевидным, что для корректного количественного анализа параметров движения на ионосферных высотах необходимы программы регулярных длительных измерений, график экспериментов был изменён. Наблюдения выполнялись в течение месяца ежеквартально, а впоследствии — ещё более продолжительно. Измерительная установка в ЗУе стала одной из опорных обсерваторий в мировой сети ионосферных станций. Видно, что наибольшее число измерений приходилось на конец 60-х — начало 70-х гг. прошлого столетия. В эти годы также активно проводились эксперименты по верификации используемого метода D1.

Самый общий анализ высотно-временного распределения направления скорости горизонтального дрейфа ионизации показывает большую разницу в системе ионосферных движений на различных высотах. Экспериментальные данные для области высот 160–200 км мы не использовали для анализа высотно-временного распределения  $U$  и  $V$  (обозначена серым цветом на *рис. 1а*), чтобы избежать ошибок интерполяции, поскольку на этот высотный интервал приходилось очень малое количество измерений (Хабитуев, Черниговская, 2023). Преобладающее направление уверенно выделяется для верхней ионосферы (высоты более 230 км). Это направление на юго-запад ( $\Phi = 180\text{--}270^\circ$ ) для всех сезонов (см. *рис. 1а*, красный цвет на шкале азимута). Для нижней ионосферы наблюдается большая изменчивость направления.

Далее анализ проводился отдельно для высот области E ионосферы (до 120 км) и для высот области F ионосферы (выше 120 км). Массивы экспериментальных данных составляли 11 031 и 18 554 измерения для областей E и F ионосферы соответственно.

*Рисунок 2* (см. с. 288) показывает особенности статистического распределения модуля вектора  $V$  скорости движения неоднородностей ионизации в ионосфере на разных высотах. Наиболее вероятные значения величины модуля вектора скорости дрейфа в E-области

составляют 60–80 м/с (см. рис. 2а), в F-области — 80–100 м/с (см. рис. 2б). Подробный анализ всех статистических распределений анализируемых динамических параметров ПИВ приводится в работе (Хабитуев, Черниговская, 2023).

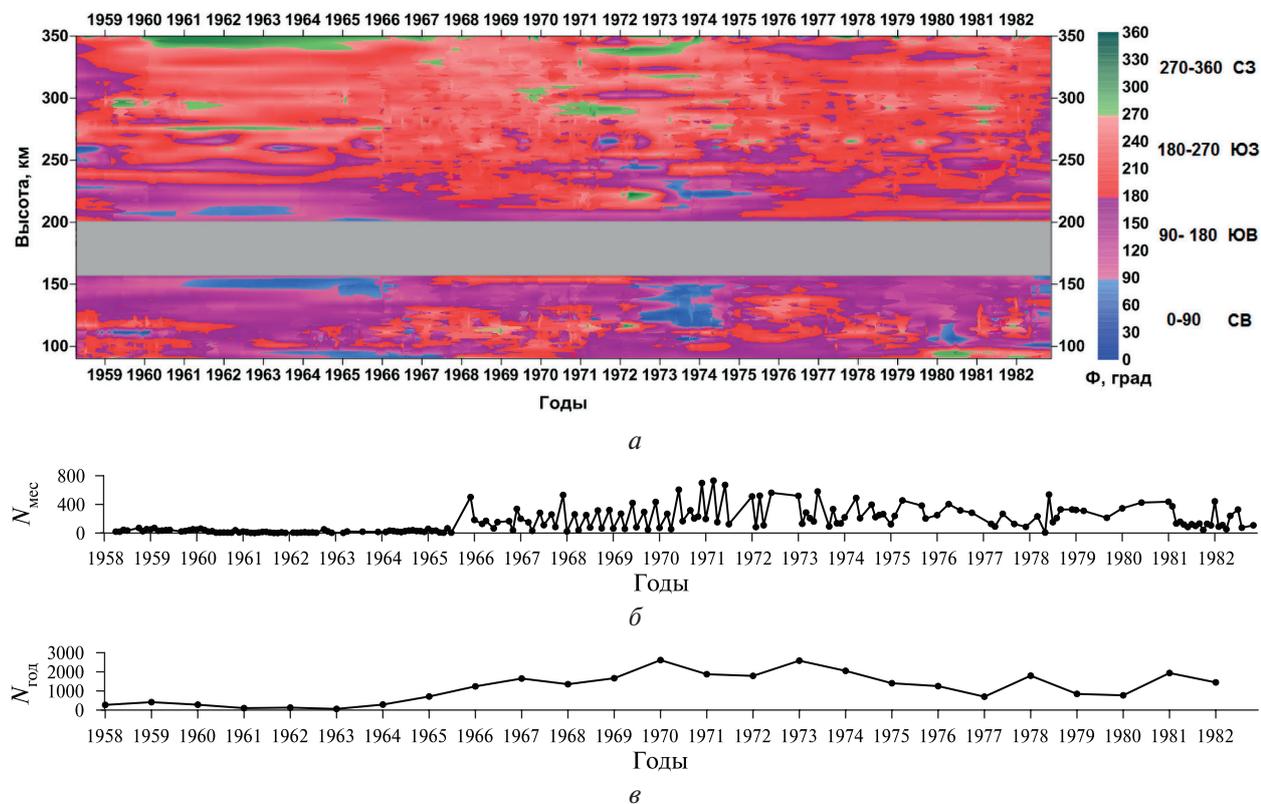


Рис. 1. Высотно-временное распределение направления (азимуты) ионосферного дрейфа (а) и временное распределение числа среднемесячных (б) и среднегодовых (в) измерений

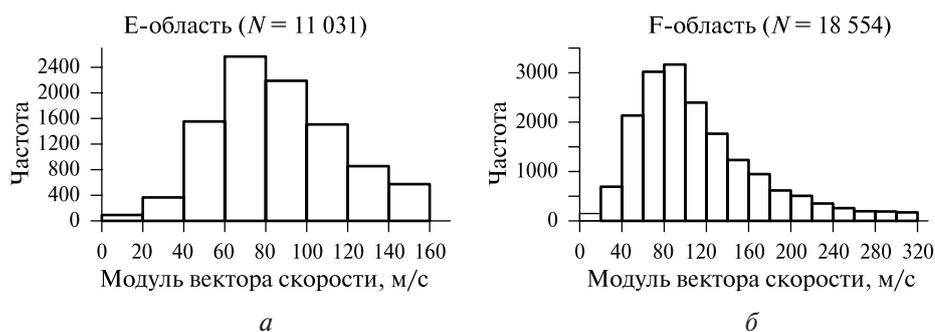


Рис. 2. Гистограммы распределения частоты повторяемости значений модуля вектора скорости  $\mathbf{V}$  для высот областей E (а) и F (б) ионосферы

Рисунок 3 (см. с. 289) демонстрирует многолетние временные вариации среднемесячных величин зональной  $U$  (см. рис. 3а, б) и меридиональной  $V$  (см. рис. 3в, г) компонент вектора скорости дрейфа ионизации в областях E и F ионосферы. Красной линией показаны сглаженные скользящим средним по 13 точкам (т.е. за год) вариации компонент скорости горизонтального дрейфа. Здесь же приведены графики количества среднегодовых измерений в E-области (см. рис. 3д) и F-области (см. рис. 3е), а также ежесуточные значения потока радиоизлучения Солнца с длиной волны 10,7 см (2800 МГц) ( $\times 10^{-22}$  Вт·м<sup>-2</sup>·Гц<sup>-1</sup>) ([http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar\\_flux.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_flux.ru.html)) (см. рис. 3ж, и).

Отчётливо видно наличие устойчивых сезонных вариаций компонент горизонтальной скорости дрейфа неоднородностей ионизации на высотах E-области ионосферы (см. рис. 3а, в). Наблюдается большая изменчивость направления (аналогично рис. 1а для высот нижней ионосферы), особенно в периоды зим, а также равноденствий. В E-области ионосферы зимой преобладает движение неоднородностей ионизации на юго-запад (см. рис. 3а, в; отрицательные величины  $U$  и  $V$  вдоль серых линий). Летом направление зональной компоненты  $U$  скорости горизонтального дрейфа ионизации меняется на восточное (см. рис. 3а). Преобладает направление горизонтального дрейфа на северо-восток, реже на юго-восток (1974–1977, 1979–1980) (см. рис. 3в).

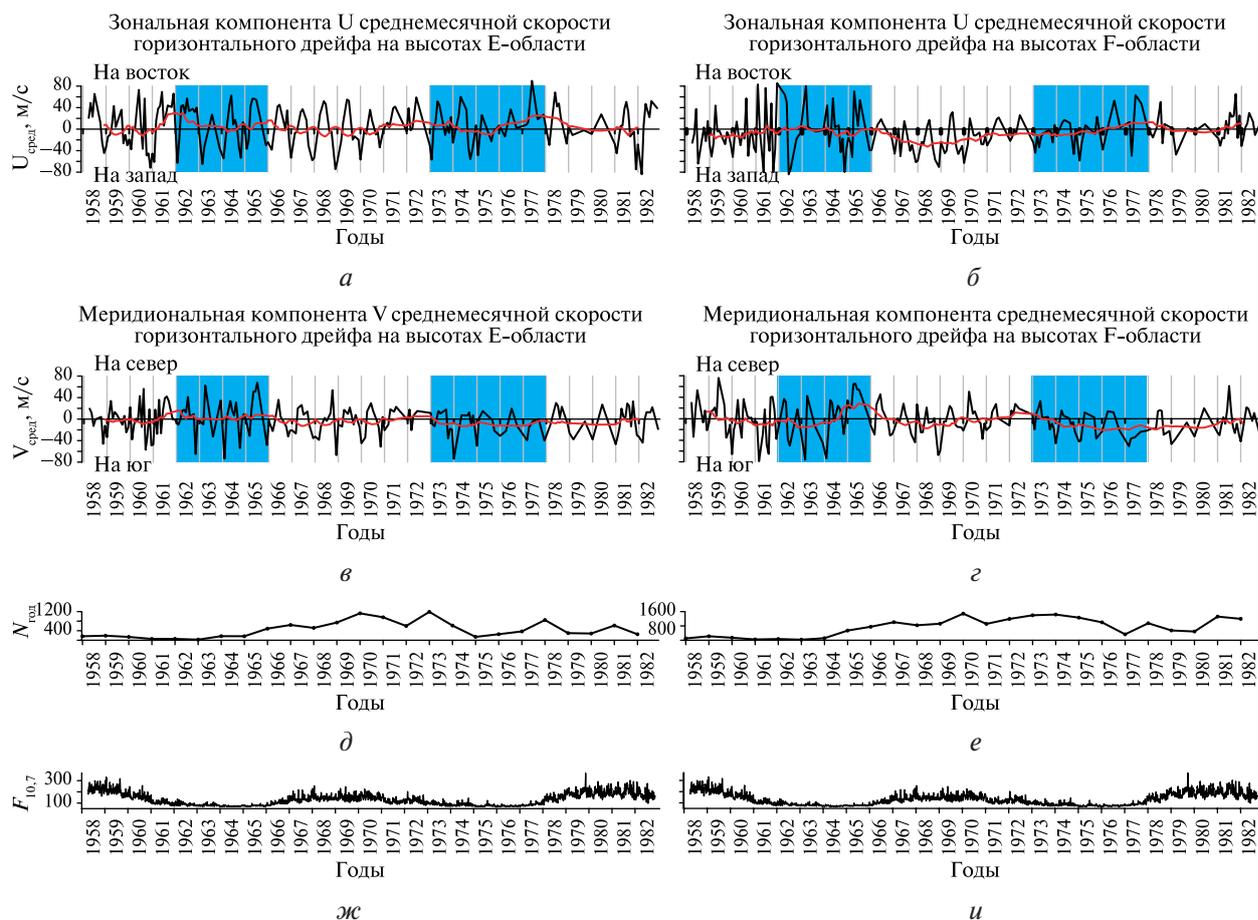


Рис. 3. Компоненты среднемесячной скорости горизонтального дрейфа: зональной  $U$  — в E-области (а) и в F-области (б); меридиональной  $V$  — в E-области (в) и F-области (г). Красной линией показаны сглаженные скользящим средним за год вариации скоростей  $U$  и  $V$ . Количество среднегодовых измерений в E-области (д), в F-области (е); ежесуточные значения индекса солнечной активности  $F_{10.7}$  ( $\times 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ ) (ж, и). Голубым цветом показаны периоды минимальной солнечной активности

Вариации динамического режима на высотах F-области ионосферы существенно отличаются. В верхней ионосфере уверенно преобладает зональное направление движения неоднородностей ионизации на запад для всех сезонов. Особенно хорошо это видно по сглаженным за год (красная линия) значениям скорости  $U$  для лет, характеризующихся высоким количеством экспериментальных измерений, — с 1967 по 1976 г. (см. рис. 3б). Меридиональная компонента скорости горизонтального дрейфа преимущественно имеет направление на юг (красная линия на рис. 3г). Таким образом, горизонтальный дрейф неоднородностей плазмы на высотах верхней ионосферы в целом направлен на юго-запад. Этот результат прекрасно согласуется с картиной высотно-временного распределения направления вектора скорости горизонтального ионосферного дрейфа (см. рис. 1а).

На всех высотах ионосферы величины скорости зимой выше, чем летом. Особенно ярко это проявляется для меридиональной компоненты ( $V$  — на юг) в Е-области (см. *рис. 3в*), а также для обеих компонент ( $U$  — на запад;  $V$  — на юг) скорости горизонтального дрейфа ионизации в F-области ионосферы (см. *рис. 3б, г*). Размах вариаций величин зональной компоненты  $U$  в Е-области (зимой — на запад, летом — на восток) примерно сопоставим для зимы и лета (см. *рис. 3а*).

Анализируемый временной интервал охватывает три неполных цикла солнечной активности (см. *рис. 3ж, и*): с максимума 19-го цикла (1958), полный 20-й цикл и до периода спада активности 21-го цикла. Сравнение многолетних средних вариаций компонент скорости горизонтального дрейфа в ионосфере с вариациями индекса радиоизлучения Солнца  $F_{10,7}$  показало, что дрейфы в F-области (см. *рис. 3б, г*) в большей степени реагируют на изменения солнечной активности. Этот результат становится ожидаемым, поскольку ионосферная плазма на этих высотах в большей степени управляется электромагнитными силами.

В нижней ионосфере на высотах Е-области сохраняется сезонная зависимость направления движения ионизации независимо от периода солнечного цикла. Минимумы активности Солнца на графиках *рис. 3а–г* отмечены голубым цветом. Чётко прослеживаются два типа циркуляции: зимний и летний. Средний зональный дрейф направлен к востоку летом и к западу зимой независимо от уровня солнечной активности (см. *рис. 3а*). Меридиональный дрейф менее регулярен. Но тенденция движения к экватору зимой выявляется более явно, чем направление к полюсу для лета и равноденствия (см. *рис. 3в*). В верхней ионосфере в периоды минимума солнечной активности системы дрейфов проявляют более высокую изменчивость по сравнению с периодами максимума активности Солнца (см. *рис. 3б, г*). Особенно это касается меридионального переноса, который не только усиливается, но и изменяет преобладающее направление движения. Сезонные вариации на высотах верхней ионосферы проявляют только величины скорости горизонтального дрейфа (зимой они выше, чем летом), но не направления движения.

Зависимость динамических ионосферных параметров от цикла солнечной активности отмечалась многими исследователями. В частности, данные по ветру в верхних слоях термосферы в средних широтах и при низкой магнитной активности, полученные с помощью радаров некогерентного рассеяния, интерферометров Фабри — Перо, а также по ионозондовым данным о вариациях высоты максимума слоя  $F_2$ , показывают уменьшение суточных амплитуд с ростом солнечной активности в течение всех сезонов (Hedin et al., 1994; Igi et al., 1999; Liu et al., 2011).

### Примеры сезонных полей циркуляции

В данном разделе в качестве дополнения к результатам статистического анализа динамических параметров, характеризующих фоновую, климатическую (усреднённую за два с половиной десятка лет) картину горизонтальных движений ионизации на ионосферных высотах (см. *рис. 1–3*), приводится реальное высотное-временное распределение скорости дрейфа неоднородностей ионизации на высотах областей Е и F ионосферы для разных сезонов года. Выбирались месяцы, обеспеченные наибольшей статистикой экспериментальных измерений.

*Рисунок 4* (см. с. 291), как и *рис. 3а, в*, вновь демонстрирует явные сезонные вариации компонент горизонтальной скорости дрейфа неоднородностей ионизации на высотах Е-области ионосферы. В Е-области ионосферы зимой (в январе 1973 г.) в целом преобладало движение неоднородностей ионизации на запад (синий цвет на *рис. 4а*, верхняя панель). Напомним, что из анализа временных вариаций среднемесячных значений  $U$ - и  $V$ -компоненты скорости дрейфа (см. *рис. 3а, б*) следует, что в Е-области ионосферы зимой преобладает движение неоднородностей ионизации на юго-запад. Но во вторую декаду января 1973 г. наблюдалась смена направления зонального и меридионального переноса ионизации с ростом высоты, характерная для распространения волнообразного ПИВ. Удалось установить, что в период с 13 по 29 января 1973 г. развивалось внезапное стратосферное потепление (ВСП) типа “major” (значительное).

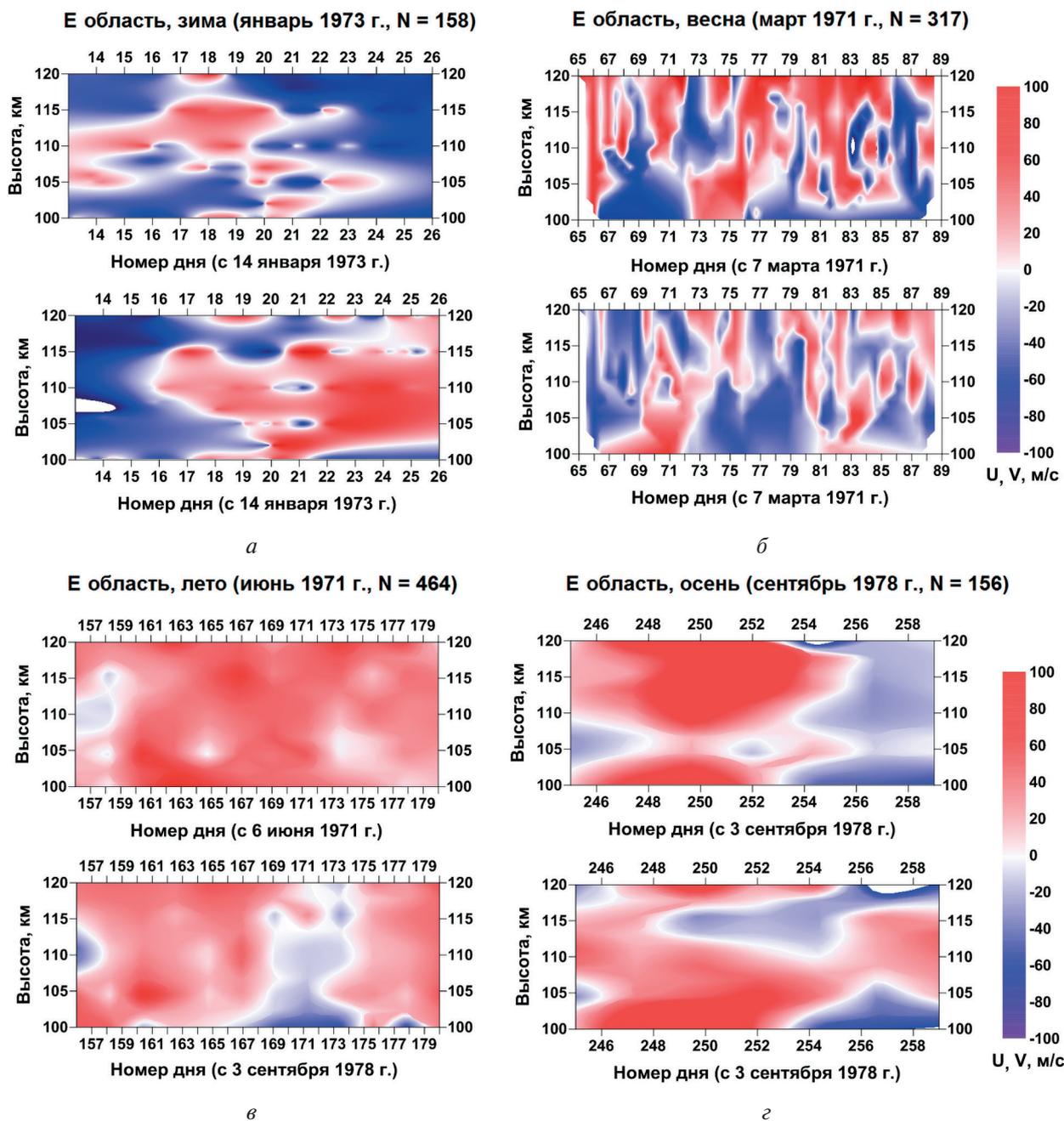


Рис. 4. Высотно-временное распределение зональной U и меридиональной V компонент скоростей дрейфа ионизации на высотах E-области ионосферы для зимы (а), весны (б), лета (в) и осени (г)

Наличие ВСП подтверждено данными архивов реанализов: NCEP/NCAR (NCEP — *англ.* National Centers for Environmental Prediction, NCAR — *англ.* National Center for Atmospheric Research) Reanalysis 1 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>, данные с 1948 г. по настоящее время); JRA-55 (*англ.* JMA (Japan Meteorological Agency) Japanese 55-year Reanalysis) ([https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index\\_en.html#jra-55](https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html#jra-55), данные за 55 лет с 1958 по 2012 г.); ECMWF ERA-40 (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis-40) (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-40-years>, данные за 45 лет с сентября 1957 г. по август 2002 г.). С анализом события ВСП можно также ознакомиться в работах (Cao et al., 2019; Hu et al., 2014; Kanzawa, 1980).

Весной (в марте 1971 г.) отмечалась сильная изменчивость направления дрейфа (см. рис. 4б), по-видимому, связанная с сезонными перестройками характера нейтральной атмо-

сферной циркуляции. Кроме того, в рассматриваемый период марта 1971 г. развивалось финальное ВСП типа “major” с максимальной фазой ВСП 20 марта 1971 г. (согласно данным (Сао et al., 2019; Ну et al., 2014) и перечисленных выше реанализов NCEP/NCAR, JRA-55 и ECMWF ERA-40).

Анализ эффектов ВСП в динамическом режиме ионосферы не является задачей настоящего исследования. Мы лишь обращаем внимание, что события ВСП, имевшие место зимой 1972–1973 гг. и весной 1971 г., могли внести существенный вклад в повышение изменчивости скорости горизонтального дрейфа неоднородностей ионизации на высотах нижней ионосферы (см. *рис. 4а, б*). К настоящему времени из анализа многочисленных экспериментальных данных и результатов теоретического моделирования установлено, что события ВСП приводят к трансформации или разрушению зимнего циркумполярного вихря в страто-мезосфере и сопровождаются существенной интенсификацией генерации атмосферных волн различного масштаба (Chernigovskaya et al., 2018; Kazimirovsky, 2002; Shpynev et al., 2015; Vincent, 2009; Yasyukevich et al., 2022; Yiğit et al., 2016). Эти волновые возмущения распространяются вверх, при определённых благоприятных условиях проникают на высоты ионосферы и проявляются в виде ПИВ.

Летний динамический режим существенно отличается от зимнего. В июне 1971 г. наблюдался стабильный зональный дрейф ионизации на восток (красный цвет на *рис. 4в*, верхняя панель). В целом преобладало направление горизонтального дрейфа на северо-восток с кратковременной сменой направления меридионального переноса к югу (см. *рис. 4в*, нижняя панель). В начале сентября 1978 г. сохранялся летний тип режима циркуляции на северо-восток, который к концу месяца начал изменяться на зимний, что свойственно периоду равенства (см. *рис. 4г*).

Карты высотно-временного распределения скорости горизонтального дрейфа на высотах нижней ионосферы (см. *рис. 4а–г*) показали, что зональная компонента  $U$  скорости превосходит по величине меридиональную  $V$ -компоненту скорости движения ионизации.

Ещё раз акцентируем внимание на выводах, сделанных в монографии Э. С. Казимировского и В. Д. Кокоурова (1979), что метод разнесённого приёма с малой базой на высотах нижней ионосферы (до высот 120–130 км) даёт количественную оценку нейтрального ветра.

На *рис. 5* (см. с. 293) приведены карты высотно-временного распределения скорости горизонтальных движений ионизации в F-области ионосферы. Статистический анализ показал, что на интервал высот 160–200 км приходится очень малое количество измерений (Хабитуев, Черниговская, 2023). Поэтому на *рис. 5* (подобно *рис. 1а*) будем анализировать особенности распределения динамических параметров для высот верхней ионосферы выше 200 км.

Горизонтальный дрейф неоднородностей ионизации на высотах верхней ионосферы в целом направлен на юго-запад. Особенно явно это видно для летнего и осеннего сезонов (преобладание синего цвета на *рис. 5в, г*). Данный результат прекрасно согласуется с картиной высотно-временного распределения направления вектора скорости горизонтального ионосферного дрейфа для всего анализируемого периода 1958–1982 гг. (см. *рис. 1а*). Преобладало направление на юго-запад ( $\Phi = 180\text{--}270^\circ$ ) для всех сезонов года. Зимой (в декабре 1970 г.) динамический режим в F-области был более изменчив (см. *рис. 5а*), чем летом (см. *рис. 5в*). В середине следующего месяца (января 1971 г.) произошло ВСП типа “major” (Сао et al., 2019; Ну et al., 2014). Таким образом, можно предположить, что в декабре 1970 г. в зимнем циркумполярном вихре на высотах страто-мезосферы уже происходила интенсификация и, возможно, трансформация струйного течения. При таких условиях циркумполярный вихрь сам по себе может стать одним из источников волновых возмущений в зимней полярной страто-мезосфере (Shpynev et al., 2015; Yasyukevich et al., 2022).

Следует также подчеркнуть, что на ионосферную плазму на высотах F-области и её динамику могут оказывать большое влияние геомагнитные бури. В атмосферу высоких широт поступает гигантская энергия из солнечного ветра через высыпавшиеся в авроральную зону частицы и через джоулеву диссипацию ионосферных токовых систем, генерируемых взаимодействием солнечного ветра и геомагнитного поля. Энергия, определяющая характер общей циркуляции атмосферы, увеличивается.

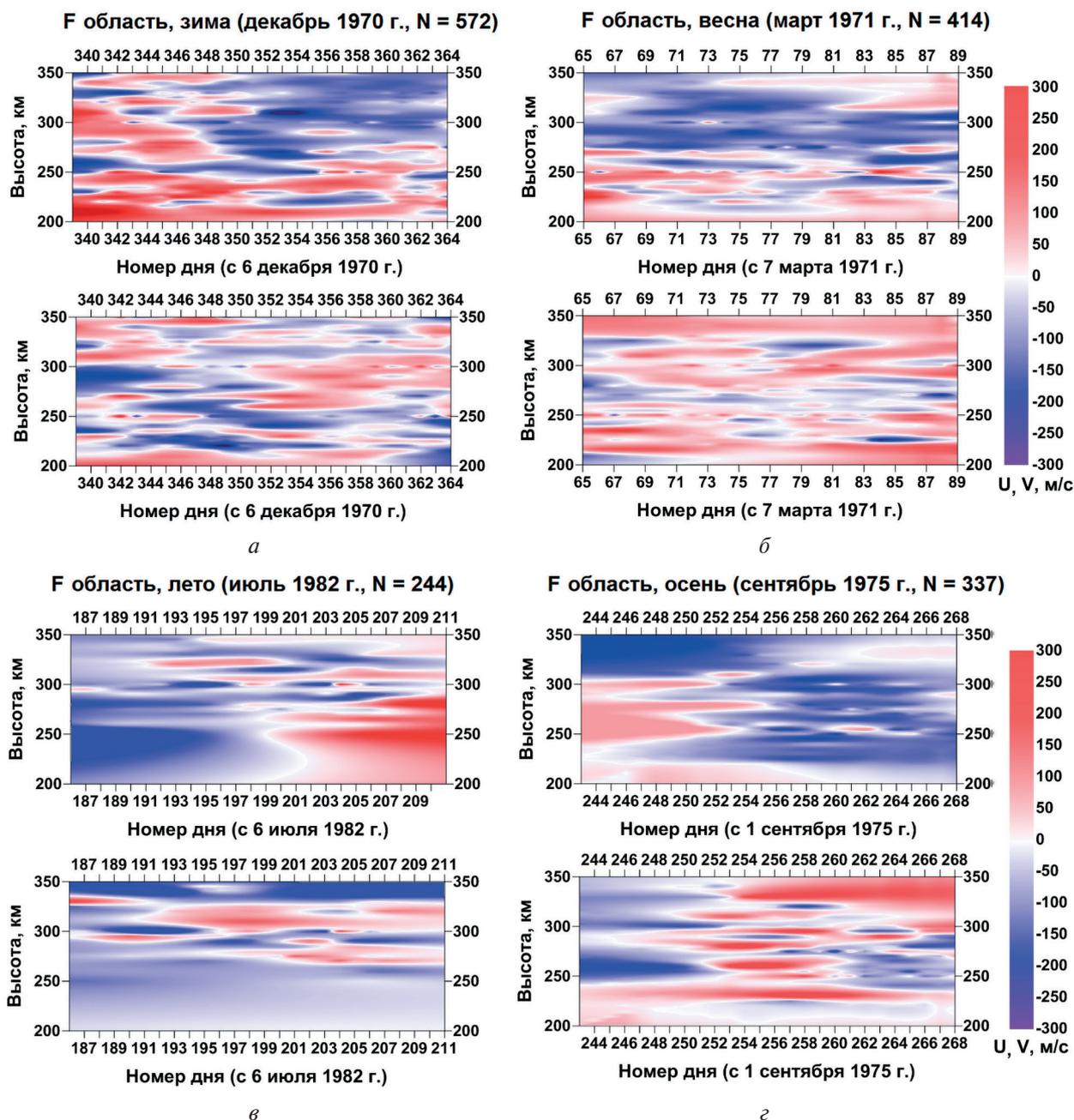


Рис. 5. Высотно-временное распределение зональной U и меридиональной V компонент скорости дрейфа ионизации на высотах F-области ионосферы для зимы (а), весны (б), лета (в) и осени (г)

Помимо этого, от авроральных источников во время магнитных бурь генерируются среднemasштабные (горизонтальная длина волны 100–300 км) и крупномасштабные (горизонтальная длина волны больше 1 тыс. км) ПИВ на высотах выше 150 км (Перевалова, Ойнац, 2020; Hocke, Schlegel, 1996). В основном ПИВ от авроральных источников наблюдаются ночью, так как днём ионное торможение выше. Среднemasштабные ПИВ наблюдаются чаще, чем крупномасштабные. Эти волновые возмущения затем могут распространяться в средние широты. В настоящем исследовании мы не выявляли геомагнитно возмущённые периоды, поскольку это отдельная большая задача.

## Выводы

Выполненное исследование позволило получить статистические многолетние характеристики дрейфа неоднородностей ионизации (так называемые фоновые характеристики горизонтальных ионосферных движений, или климатические нормы) над среднеширотным регионом юга Восточной Сибири и сформулировать следующие результаты.

1. Выполнен статистический анализ многолетнего архива (объёмом 29 585 величин) однородных измерений горизонтальных скоростей дрейфа ионизации на высотах областей E и F ионосферы вблизи г. Иркутска (52° с. ш., 104° в. д.) почти за 25 лет с апреля 1958 г. по ноябрь 1982 г. Анализировались отдельно область E ионосферы (высоты до 120 км; 11 031 измерение) и область F ионосферы (высоты выше 120 км; 18 554 измерения).

2. Подтверждены явные различия в характере динамического режима нижней (E-область) и верхней (высоты F-области выше 200 км) ионосферы.

3. С ростом высоты скорость горизонтального дрейфа ионизации возрастает. Наиболее вероятная величина модуля вектора скорости дрейфа в нижней ионосфере составляет 60–80 м/с, на высотах F-области — 80–100 м/с. Экспериментальные значения компонент U и V скорости горизонтального дрейфа на высотах верхней ионосферы могли достигать величин 200–300 м/с.

4. Для нижней ионосферы характерна высокая изменчивость горизонтальной скорости движений. По оценкам, приведённым в монографии Казимировского и Кокоурова (1979) и цитируемой в ней литературе, метод D1 на этих высотах даёт данные о скорости нейтрального ветра. Статистический анализ позволил чётко выделить в нижней ионосфере сезонные вариации величины и направления скорости движения. Наблюдается большая изменчивость направления движения, особенно зимой и в периоды равноденствия. В E-области ионосферы зимой преобладает движение неоднородностей ионизации на юго-запад. Летом направление зональной компоненты U скорости горизонтального дрейфа ионизации меняется на восточное (преобладает направление на северо-восток, реже на юго-восток).

На высотах верхней ионосферы метод разнесённого приёма D1 даёт информацию о скорости дрейфа среднемасштабных (порядка 100 км) неоднородностей ионизации. Уверенно наблюдается преобладающее направление движения неоднородностей ионизации на юго-запад для всех сезонов (высоты более 230 км). Динамический режим на высотах F-области более регулярен. Но изменчивость горизонтального движения неоднородностей ионизации также присутствует, особенно зимой и в периоды равноденствия.

5. Скорость зимой в целом выше, чем летом. Особенно ярко это проявляется в верхней ионосфере как для зональной (U направлена зимой на запад), так и для меридиональной (V направлена зимой на юг) компонент скорости горизонтального дрейфа ионизации. В нижней ионосфере эта закономерность выполняется для меридиональной компоненты (V направлена зимой на юг). Величины зональной компоненты U в E-области для зимы (на запад) и для лета (на восток) примерно сопоставимы.

6. Выявлена зависимость динамических параметров верхней ионосферы от цикла солнечной активности. В периоды минимума солнечной активности системы дрейфа проявляют более высокую изменчивость по сравнению с периодами максимума активности Солнца. Особенно это касается меридионального переноса, который не только усиливается, но и изменяет преобладающее направление движения.

7. Причинами высокой изменчивости динамического режима ионосферы могут быть геомагнитные бури (особенно для верхней ионосферы), а на высотах нижней ионосферы — события в нижележащей нейтральной атмосфере (например, ВСП и струйные течения, связанные с зимним циркумполярным вихрем), а также сезонные перестройки атмосферной циркуляции нейтрального газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) (<http://ckp-rg.ru/ckp/3056/>).

## Литература

1. Данилов А. Д., Константинова А. В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 4. С. 411–435. DOI: 10.31857/S0016794020040045.
2. Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука, 1979. С. 68–97.
3. Перевалова Н. П., Ойнац А. В. Морфология ночных среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений в среднеширотной области F (обзор современных представлений). Иркутск: Изд-во ИГУ, 2020. 84 с.
4. Петрухин В. Ф. Измерения горизонтальных дрейфов (метод D1) // Ин-т солнечно-земной физики: создание и развитие / отв. ред. Г. А. Жеребцов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. С. 306–312.
5. Поляков В. М., Щепкин Л. А., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.
6. Толстиков М. В., Ойнац А. В., Артамонов М. Ф., Медведева И. В., Ратовский К. Г. Статистическая связь перемещающихся ионосферных возмущений с нейтральным ветром и возмущениями в стратосфере // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 4. С. 83–94. DOI: 10.12737/szf-84202208.
7. Хабитуев Д. С., Черниговская М. А. Ретроспективный анализ многолетних региональных особенностей динамического режима ионосферы над югом Восточной Сибири // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. (В печати.)
8. Cao C., Chen Y.-H., Rao J., Liu S.-M., Li S.-Y., Ma M.-H., Wang Y.-B. Statistical Characteristics of Major Sudden Stratospheric Warming Events in CESM1-WACCM: A Comparison with the JRA55 and NCEP/NCAR Reanalyses // Atmosphere. 2019. V. 10. Art. No. 519. DOI: 10.3390/atmos10090519.
9. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J. Ionospheric Response to Winter Stratosphere/Lower Mesosphere Jet Stream in the Northern Hemisphere as Derived from Vertical Radio Sounding Data // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 180. P. 126–136. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.08.033.
10. Hedin A. E., Buonsanto M. J., Codrescu M., Duboin M.-L., Fesen C. G., Hagan M. E., Miller K. L., Sipler D. P. Solar activity variations in mid-latitude thermospheric meridional winds // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. Iss. A9. P. 17601–17608.
11. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Annales Geophysicae. 1996. V. 14. P. 917–940. DOI: 10.1007/s00585-996-0917-6.
12. Hu J., Ren R., Xu H. Occurrence of Winter Stratospheric Sudden Warming Events and the Seasonal Timing of Spring Stratospheric Final Warming // J. Atmospheric Sciences. 2014. V. 71. P. 2319–2334. DOI: 10.1175/JAS-D-13-0349.1.
13. Igi S., Oliver W. L., Ogawa T. Solar cycle variations of the thermospheric meridional wind over Japan derived from measurements of  $h_m F_2$  // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. No. A10. P. 22427–22431.
14. Kanzawa H. The Behavior of Mean Zonal Wind and Planetary-Scale Disturbances in the Troposphere and Stratosphere during the 1973 Sudden Warming // J. Meteorological Society of Japan. 1980. V. 58. No. 5. P. 329–355.
15. Kazimirovsky E. S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // Annales Geophysicae. 2002. V. 45. No. 1. P. 11–29. DOI: 10.4401/AG-3482.
16. Kazimirovsky E. S., Kokourov V. D., Vergasova G. V. Dynamical climatology of the upper mesosphere, lower thermosphere and ionosphere // Surveys in Geophysics. 2006. V. 27. P. 211–255. DOI: 10.1007/s10712-005-3819-3.
17. Laštovička J. Long-Term Changes in Ionospheric Climate in Terms of foF2 (Review) // Atmosphere. 2022. V. 13. Art. No. 110. DOI: 10.3390/atmos13010110.
18. Liu L. B., Wan W. X., Chen Y. D., Le H. J. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review // Chinese Science Bull. 2011. V. 56. P. 1202–1211. DOI: 10.1007/s11434-010-4226-9.
19. Oinats A. V., Nishitani N., Ponomarenko P., Berngardt O. I., Ratovsky K. G. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. Art. No. 8. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8.
20. Rishbeth H. Long-term changes in the ionosphere // Advances in Space Research. 1997. V. 20. No. 11. P. 2149–2155. DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00607-8.
21. Shcherbakov A. A., Medvedev A. V., Kushnarev D. S., Tolstikov M. V., Alsatkin S. S. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar // J. Geophysical Research: Space Physics. 2015. V. 120. No. 12. P. 10851–10863. DOI: 10.1002/2015JA021678.
22. Shpynev B. G., Churilov S. M., Chernigovskaya M. A. Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. V. 136. P. 201–215. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.005.
23. Vincent R. A. Gravity wave coupling from below: A review // Climate and Weather of the Sun–Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symp. Tokyo: TERRAPUB, 2009. P. 279–293.

24. Yasyukevich A. S., Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Khabituev D. S., Yasyukevich Y. V. Features of Winter Stratosphere Small-Scale Disturbance during Sudden Stratospheric Warmings // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Art. No. 2798. DOI: 10.3390/rs14122798.
25. Yiğit E., Koucká Knížová P., Georgieva K., Ward W. A review of vertical coupling in the Atmosphere–Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016. V. 141. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.02.011.

## Long-term variations of ionization drift velocities over the south of Eastern Siberia

M. A. Chernigovskaya, D. S. Khabituev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*  
*E-mail: cher@iszf.irk.ru*

Based on statistical analysis of a large array of archival experimental data on the dynamic regime of the ionosphere over Irkutsk, statistical long-term characteristics of the horizontal drift of ionization irregularities over the region of the south of Eastern Siberia have been obtained. The measurements were carried out by radiophysical spaced-receiver method with a small base of the radio signal reflected from the ionosphere during vertical ground-based radio sounding in 1958–1982. The analysis of the data of long-term measurements confirmed the obvious differences in the nature of the dynamic regime of the lower and upper ionosphere. It is shown that the motion of ionization in the zonal direction is more regular than the meridional drift. The characteristic seasonal features of variations in the amplitudes and directions of horizontal drift motions at altitudes E and F of the ionosphere regions are determined.

**Keywords:** ionospheric dynamics, spaced-receiver method, long-term variations, seasonal variations, lower and upper ionosphere, statistical data analysis

Accepted: 14.06.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-285-297

## References

1. Danilov A. D., Konstantinova A. V., Long-term variations in the parameters of the middle and upper atmosphere and ionosphere (review), *Geomagnetizm i Aeronomiya*, 2020, Vol. 60, Issue 4, pp. 397–420, DOI: 10.1134/S0016793220040040.
2. Kazimirovsky E. S., Kokourov V. D., *Dvizheniya v ionosphere* (Motions in the ionosphere), Novosibirsk: Nauka, 1979, pp. 68–97 (in Russian).
3. Perevalova N. P., Oinats A. V., *Morfologiya nochnykh srednemasshtabnykh peremeshchayushchikhsya ionosfernykh vozmushchenii v sredneshirotnoi oblasti F (obzor sovremennykh predstavlenii)* (Morphology of nighttime medium-scale travelling ionospheric disturbances in the mid-latitude F region (review of current concepts), Irkutsk: Izd. IGU, 2020, 84 p. (in Russian).
4. Petrukhin V. F., Horizontal drift measurements (metod D1), In: *Institut solnechno-zemnoi fiziki: sozдание i razvitiye* (Institute of Solar-Terrestrial Physics: Formation and Development), G. A. Zherebtsov (ed.), Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2015, pp. 306–312 (in Russian).
5. Polyakov V. M., Shchepkin L. A., Kazimirovsky E. S., Kokourov V. D., *Ionosfernye protsessy* (Ionospheric processes), Novosibirsk: Nauka, 1968, 535 p. (in Russian).
6. Tolstikov M. V., Oinats A. V., Artamonov M. F., Medvedeva I. V., Ratovsky K. G., Statistical relation of traveling ionospheric disturbances with neutral wind and disturbances in the stratosphere, *Solar-Terrestrial Physics*, 2022, Vol. 8, Issue 4, pp. 78–88, DOI: 10.12737/stp-84202208.
7. Khabituev D. S., Chernigovskaya M. A., Retrospective analysis of long-term regional features of the dynamic regime of the ionosphere over the south of Eastern Siberia, *Solar-Terrestrial Physics*, 2023, V. 9. (In press.)

8. Cao C., Chen Y.-H., Rao J., Liu S.-M., Li S.-Y., Ma M.-H., Wang Y.-B., Statistical Characteristics of Major Sudden Stratospheric Warming Events in CESM1-WACCM: A Comparison with the JRA55 and NCEP/NCAR Reanalyses, *Atmosphere*, 2019, Vol. 10, Art. No. 519, DOI: 10.3390/atmos10090519.
9. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J., Ionospheric Response to Winter Stratosphere/Lower Mesosphere Jet Stream in the Northern Hemisphere as Derived from Vertical Radio Sounding Data, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, Vol. 180, pp. 126–136, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.08.033.
10. Hedin A. E., Buonsanto M. J., Codrescu M., Duboin M.-L., Fesen C. G., Hagan M. E., Miller K. L., Sipler D. P., Solar activity variations in mid-latitude thermospheric meridional winds, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, No. A9, pp. 17601–17608.
11. Hocke K., Schlegel K., A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995, *Annales Geophysicae*, 1996, Vol. 14, pp. 917–940, DOI: 10.1007/s00585-996-0917-6.
12. Hu J., Ren R., Xu H., Occurrence of Winter Stratospheric Sudden Warming Events and the Seasonal Timing of Spring Stratospheric Final Warming, *J. Atmospheric Sciences*, 2014, Vol. 71, pp. 2319–2334, DOI: 10.1175/JAS-D-13-0349.1.
13. Igi S., Oliver W. L., Ogawa T., Solar cycle variations of the thermospheric meridional wind over Japan derived from measurements of  $h_m F2$ , *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. A10, pp. 22427–22431.
14. Kanzawa H., The Behavior of Mean Zonal Wind and Planetary-Scale Disturbances in the Troposphere and Stratosphere during the 1973 Sudden Warming, *J. Meteorological Society of Japan*, 1980, Vol. 58, No. 5, pp. 329–355.
15. Kazimirovsky E. S., Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review, *Annales Geophysicae*, 2002, Vol. 45, No. 1, pp. 11–29, DOI: 10.4401/AG-3482.
16. Kazimirovsky E. S., Kokourov V. D., Vergasova G. V., Dynamical climatology of the upper mesosphere, lower thermosphere and ionosphere, *Surveys in Geophysics*, 2006, Vol. 27, pp. 211–255, DOI: 10.1007/s10712-005-3819-3.
17. Laštovička J., Long-Term Changes in Ionospheric Climate in Terms of foF2 (Review), *Atmosphere*, 2022, Vol. 13, Art. No. 110, DOI: 10.3390/atmos13010110.
18. Liu L. B., Wan W. X., Chen Y. D., Le H. J., Solar activity effects of the ionosphere: A brief review, *Chinese Science Bull.*, 2011, Vol. 56, pp. 1202–1211, DOI: 10.1007/s11434-010-4226-9.
19. Oinats A. V., Nishitani N., Ponomarenko P., Bergardt O. I., Ratovsky K. G., Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data, *Earth, Planets and Space*, 2016, Vol. 68, Art. No. 8, DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8.
20. Rishbeth H., Long-term changes in the ionosphere, *Advances in Space Research*, 1997, Vol. 20, No. 11, pp. 2149–2155, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00607-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00607-8).
21. Shcherbakov A. A., Medvedev A. V., Kushnarev D. S., Tolstikov M. V., Alsatkin S. S., Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2015, Vol. 120, No. 12, pp. 10851–10863, DOI: 10.1002/2015JA021678.
22. Shpynev B. G., Churilov S. M., Chernigovskaya M. A., Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, Vol. 136, pp. 201–215, DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.005.
23. Vincent R. A., Gravity wave coupling from below: A review, *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symp.*, Tokyo: TERRAPUB, 2009, pp. 279–293.
24. Yasyukevich A. S., Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Khabituев D. S., Yasyukevich Y. V., Features of Winter Stratosphere Small-Scale Disturbance during Sudden Stratospheric Warmings, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Art. No. 2798, DOI: 10.3390/rs14122798.
25. Yiğit E., Koucká Knížová P., Georgieva K., Ward W., A review of vertical coupling in the Atmosphere-Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, Vol. 141, pp. 1–12, DOI: 10.1016/j.jastp.2016.02.011.