

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИОНОСФЕРЫ НАД ЮГОМ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF LONG-TERM REGIONAL FEATURES OF THE DYNAMIC REGIME OF THE IONOSPHERE OVER THE SOUTH OF EASTERN SIBERIA

Д.С. Хабитуев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, Khabituev@iszf.irk.ru*

М.А. Черниговская 

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

D.S. Khabituev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, Khabituev@iszf.irk.ru*

M.A. Chernigovskaya

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

Аннотация. Выполнен статистический анализ массива архивных экспериментальных данных о динамическом режиме ионосферы над Иркутском, полученных в 1958–1982 гг. радиофизическим методом разнесенного приема с малой базой отраженного от ионосферы радиосигнала при вертикальном наземном радиозондировании. Получены статистические многолетние характеристики дрейфа неоднородностей ионизации над регионом юга Восточной Сибири. Подтверждены 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 величин и направлений горизонтальных дрейфовых движений на высотах областей E и F ионосферы. Для нижней ионосферы характерна высокая изменчивость и сезонные вариации скоростей движений. Зимой зональная компонента скорости горизонтального дрейфа ионизации направлена на запад, летом — на восток. На высотах верхней ионосферы динамический режим более регулярен. Наблюдается преобладающее зональное направление движения неоднородностей ионизации на запад для всех сезонов (высоты более 230 км). Меридиональная компонента скорости горизонтального дрейфа преимущественно имеет направление на юг. Таким образом, горизонтальный дрейф неоднородностей плазмы на высотах верхней ионосферы в целом направлен на юго-запад с преобладанием зонального направления.

Ключевые слова: динамика ионосферы; метод разнесенного приема, многолетние вариации, сезонные вариации, нижняя и верхняя ионосфера, статистический анализ данных.

Abstract. We have carried out a statistical analysis of a huge array of archival experimental data on the dynamic regime of the ionosphere over Irkutsk, obtained by a radiophysical spaced-receiver method with a small base of a radio signal reflected from the ionosphere during vertical ground-based radio sounding near Irkutsk in 1958–1982. Statistical long-term characteristics of drifts of ionization irregularities over the region of the south of Eastern Siberia were obtained. We confirmed clear differences in the nature of the dynamic regime of the lower and upper ionosphere. The motion of ionization in the zonal direction is shown to be more regular than the meridional drift. We determined the characteristic seasonal features of variations in magnitudes and directions of horizontal drift motions at heights of E and F ionospheric regions. The lower ionosphere is characterized by high variability and seasonal variations in motion velocities. In winter, the zonal component of the horizontal ionization drift velocity is directed to the west; in summer, to the east. At the heights of the upper ionosphere, the dynamic regime is more regular. The prevailing zonal direction of the motion of ionization irregularities to the west is observed for all seasons (heights above 230 km). The meridional component of the horizontal drift velocity mainly has a southerly direction. Thus, the horizontal drift of plasma irregularities at the heights of the upper ionosphere is, on the whole, directed to the southwest with the zonal direction predominating.

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

ВВЕДЕНИЕ

При описании особенностей пространственно-временного распределения (типичного или аномального) любого геофизического параметра, характеризующего атмосферные процессы, необходимо, прежде всего, иметь информацию о климатических

нормах поведения анализируемой характеристики. Многолетние средние характеристики (средние значения и структурные средние) атмосферных параметров (годовые, сезонные, месячные, суточные и т. д.), их повторяемость носят название климатических норм; соответствующие величины для отдельных

дней, месяцев, лет и прочее рассматриваются как отклонение от этих норм.

Всемирной метеорологической организацией (ВМО) принято считать (по решению 2014 г.) климатической нормой среднюю величину метеорологического параметра, статистически полученную из многолетнего ряда однородных наблюдений в данной местности за 30-летний период. В качестве базового и стабильного периода принят промежуток 1961–1990 гг. Каждые 10 лет следует обновлять климатические нормы, сдвигая базовый период на 10 лет. Все более новые климатические нормы будут сравниваться с периодом 1961–1990 гг. для выявления тенденции изменения климата.

Стандартное определение климата связано с некоторым средним состоянием и тенденцией метеорологических параметров в нижней атмосфере Земли до высоты тропопаузы. Однако с точки зрения объяснения факторов, управляющих климатом, такое определение явно узкое [Kazimirovsky et al., 2006]. В настоящее время термины «метеорология» и «климатология» применяются к средней и верхней атмосфере, включая ионосферу. Это сложнее наложение физических, химических и биологических эффектов. Системные междисциплинарные подходы к изучению изменчивости солнечно-земной среды приводят к пониманию краткосрочных (космическая погода) и долгосрочных (космический климат) изменений. В связи с глобальным изменением климата это имеет и социальные приложения, такие, например, как деятельность человека в космосе и необходимость повышения надежности технологических систем, производительность которых зависит от изменений в окружающей среде.

Важность изучения многолетних (или долговременных) трендов подчеркивается множеством исследований в этом направлении, информация о которых приводится в ряде обширных обзоров [Rishbeth, 1997; Данилов, 2012; Kazimirovsky et al., 2006; Данилов, Константинова, 2020; Laštovička, 2022]. 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.

В настоящей работе приводятся результаты статистического анализа архивных многолетних рядов однородных измерений параметров, характеризующих особенности динамического режима ионосферы на высотах E- и F-областей, вблизи Иркутска (52° N, 104° E) в 1958–1982 гг.

АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальной основой статистического анализа, проведенного нами в настоящей работе, являются архивные наблюдательные данные о динамическом режиме ионосферы, полученные ра-

диофизическим методом разнесенного приема отраженного от ионосферы радиосигнала при вертикальном наземном радиозондировании, который дает информацию о движении неоднородной структуры в распределении ионосферной ионизации.

Систематические измерения дрейфа неоднородностей ионизации — другими словами, перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в ионосфере — были начаты с апреля 1958 г., фактически с первых дней существования Института (в те годы — Сибирский институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн — СибИЗМИР). Специальное оборудование для экспериментальных измерений ионосферных дрейфов методом близко расположенных приемников (метод разнесенного приема D1) было разработано в лаборатории динамики ионосферы СибИЗМИР [Казимировский, Кокоуров, 1979; Петрухин, 2015]. С научными результатами анализа полученных в те годы экспериментальных данных сотрудники Института принимали активное участие во всемирных научных программах Международного геофизического года (МГГ, 1957–1958 гг.), года Международного геофизического сотрудничества (МГС, 1959 г.), Международного года спокойного Солнца (МГСС, 1964–1965 гг.).

Наблюдения дрейфов на высотах E- и F-областей велись на измерительном комплексе (рис. 1, а), состоящем из передающего пункта (1), излучающего сигналы в коротковолновом (КВ) диапазоне (рабочая частота 2.2 МГц), находящегося в д. Зуй (52°28' N, 102°04' E, 30 км к северу от Иркутска); контрольно-измерительного центра (2) и трех разнесенных по поверхности Земли приемных антенн (3), расположенных также в д. Зуй. Параметры оборудования приведены в [Kazimirovsky, Kokourov, 1972; Казимировский, Кокоуров, 1979]. Приемные 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 направлениях. Измерения проводились круглосуточно, продолжительность сеанса наблюдений — 5 мин. Для расчетов скорости дрейфа днем использовались радиоотражения от областей E и E_s, ночью — от области F.

Электромагнитный импульс излучается вверх и отражается от соответствующего ионосферного слоя (рис. 1, а). Для радиоволн, отразившихся от ионосферы, область отражения представляет собой дифракционный экран, образованный неоднородностями ионизации. В области отражения меняются характеристики сигнала: амплитуда, фаза, направление распространения, поляризации, групповая задержка и т. д. Поэтому картина поля характеристик распределения сигнала на поверхности Земли несет в себе информацию о свойствах формирующих ее неоднородностей. Принятая радиоволна обнаруживает вариации в направлении, перпендикулярном волновому фронту. Это связано как с дрейфом дифракционного экрана в целом, так и с изменениями его структуры в процессе движения. Выделение информации о скорости дрейфа производится путем измерения параметров поля сигнала (дифракционной картины) в нескольких точках земной поверх-

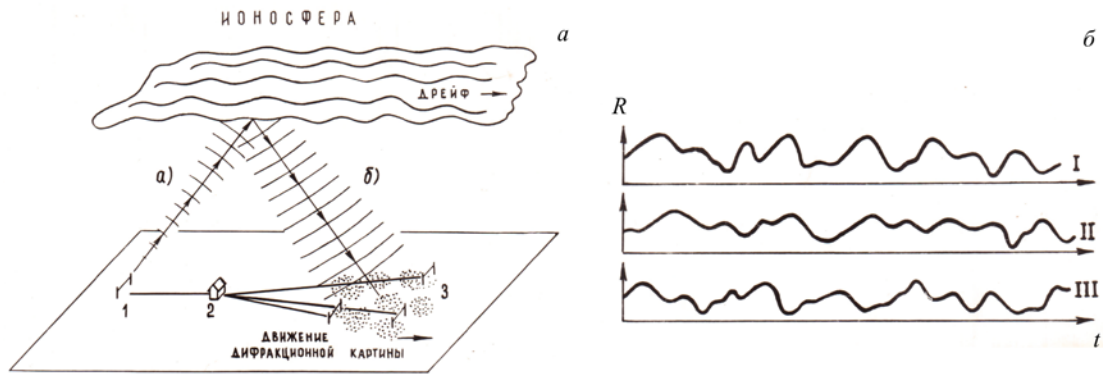


Рис. 1. Схема комплекса для измерений дрейфов методом D1 (а); запись амплитуд отраженного от ионосферы сигнала для трех пространственно-разнесенных антенн (б)

ности (см. рис. 1, а). Скорость дрейфа ПИВ рассчитывалась как половина скорости движения дифракционной картины на Земле.

Вектор скорости горизонтального дрейфа ионизации рассчитывался по сдвигам записей временных вариаций $R(t)$ амплитуд отраженных от ионосферы и зарегистрированных приемниками сигналов (см. рис. 1, б) с использованием метода подобных замираний [Казимировский, Кокоуров, 1979]. В методе подобия предполагается, что расстояние между точками приема меньше линейных размеров рассеивающих центров, дифракционная картина не меняет своей структуры за время перемещения экрана над системой приемных антенн, за время сеанса скорость дрейфа в среднем остается постоянной. Предполагается также, что дифракционная картина изотропна.

Обобщение данных многолетних измерений ионосферных движений, сравнение и взаимная калибровка с результатами экспериментальных измерений другими методами (ракетные пуски, радиолокация метеорных следов, фотографирование искусственных светящихся облаков, метод D3), а также с модельными расчетами позволили сделать вывод о том, что в областях D и E ионосферы усредненные скорости дрейфа, полученные методом D1, совпадают со скоростью нейтрального ветра. Для F-области надежно установлено, что метод D1 дает информацию только о дрейфовых движениях неоднородностей ионизации, отождествление этих движений со скоростью нейтрального ветра является некорректным. Полученные особенности метода D1 необходимо учитывать при физической интерпретации результатов измерений ([Казимировский, Кокоуров, 1979] и ссылки в монографии).

Измерения на данной экспериментальной установке проводились с апреля 1958 по ноябрь 1982 г. Анализируемый временной интервал охватывает три неполных цикла солнечной активности: с максимума 19 цикла (1958 г.), полный 20-й цикл и до периода спада активности 21-го цикла. До сентября 1973 г. регистрация велась на киноплёнку, позже проводилась цифровая запись на магнитофон. Полученные на установке в д. Зуй экспериментальные данные были опубликованы в 1968–1984 гг. в 18-ти выпусках сборника «Результаты ионосферных наблю-

дений. Измерения горизонтальных дрейфов неоднородностей в ионосфере». Эти сборники оперативно-информационного материала являлись приложением к выпускаемому в те годы в СибИЗМИР сборнику научных статей «Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца» (с 2015 г. — журнал «Солнечно-земная физика»). Таблицы содержат дату и время измерения, модуль V (м/с) и азимут Φ (град) вектора скорости дрейфа, а также его зональную и меридиональную компоненты V_x , V_y .

Итогом многолетней работы научных сотрудников стало создание глобальной эмпирической модели движений на уровнях E- и F-областей [Kazimirovsky et al., 1994], которая вошла как составная часть в Международную справочную модель ионосферы IRI-90.

Для осуществления статистического анализа, представленного в настоящей работе, данные измерений ионосферного дрейфа были оцифрованы, создан архив данных значений скоростей дрейфа на высотах ионосферы. Разработана программа [Хабитуев, Черниговская, 2022], позволяющая считывать данные вертикального зондирования ионосферы различных архивных форматов, форматировать их, а также проводить визуальное отображение скоростей движения ионизации.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для статистического анализа использовался весь массив (29585 измерений) архивных экспериментальных данных почти за 25 лет с апреля 1958 по ноябрь 1982 г. Анализировались распределения значений модуля V (м/с) и направления Φ (град) вектора скорости дрейфа, а также значений зональной V_x (+ на восток) и меридиональной V_y (+ на север) компонент вектора скорости дрейфа. Направление (азимут) Φ скорости дрейфа отсчитывался по часовой стрелке от направления на север. На рис. 2 показаны высотно-временные распределения зональной V_x (см. рис. 2, а) и меридиональной V_y (см. рис. 2, б) скоростей дрейфа ионизации в интервале высот 100–350 км. Распределение числа измерений по годам показано на рис. 2, в, г. До 1965 г. измерений было мало. В соответствии с общепринятыми в те годы междуна-

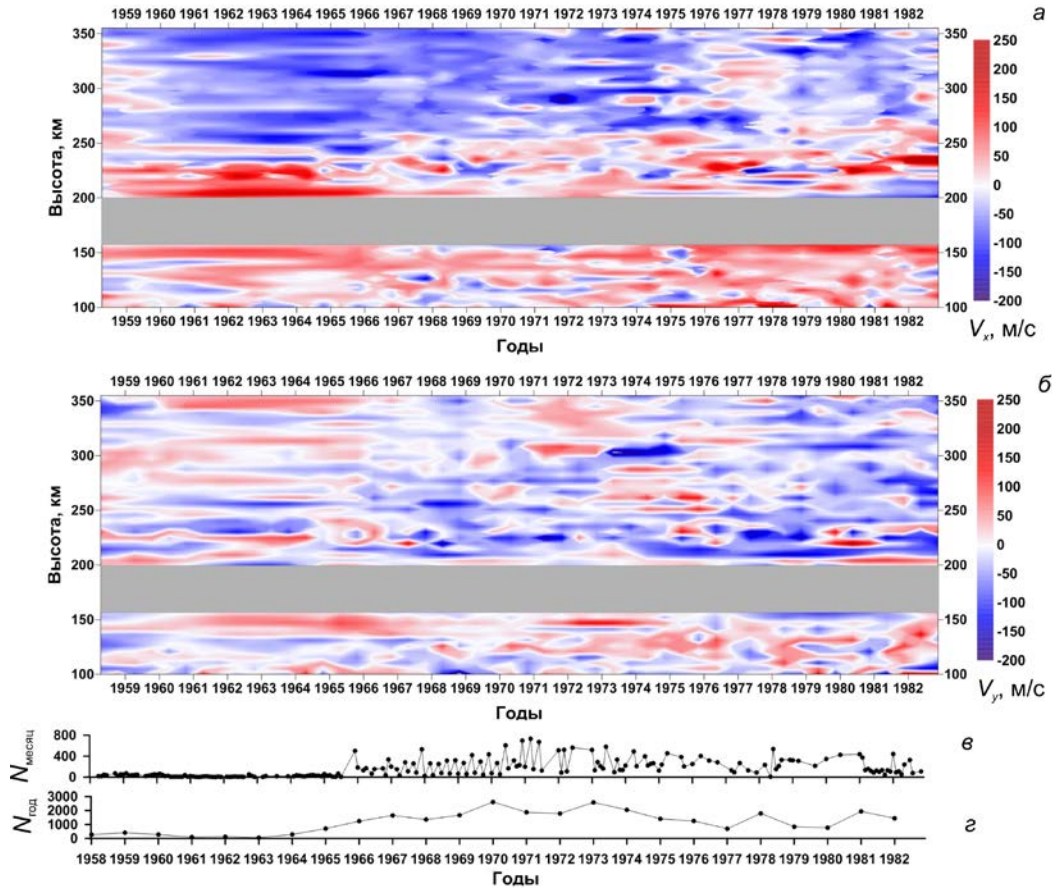


Рис. 2. Высотно-временные распределения зональной V_x (а), меридиональной V_y (б) скоростей дрейфа и временные распределения числа среднемесячных (в) и среднегодовых (з) измерений

родными программами координированных наблюдений измерения проводились ежечасно 3–4 дня в месяц. Анализ параметров ионосферных дрейфов показал, что движения ионизации, несмотря на сильную изменчивость во времени, проявляют устойчивые средние пространственно-временные характеристики. Стало очевидным, что для корректного количественного анализа параметров движений на ионосферных высотах необходимы программы регулярных измерений синоптического характера. Поэтому с конца 1965 г. стали проводиться ежеквартальные месячные наблюдения, а впоследствии — более продолжительные. Измерительная установка в Зуе стала одной из опорных в мировой сети ионосферных станций. Видно, что наибольшее число измерений приходилось на конец 60-х – начало 70-х гг. прошлого столетия. В эти годы активно проводились также эксперименты по верификации используемого метода D1: эксперименты «Радиус» [Kazimirovsky et al., 1971] и «Стрела» [Kazimirovsky, 1976].

Самый общий анализ высотно-временных распределений зональной V_x (см. рис. 2, а) и меридиональной V_y (см. рис. 2, б) компонент скорости дрейфа ионизации показывает, что движение в зональном направлении более регулярно, чем меридиональный дрейф. Преобладающее направление уверенно выделяется для верхней ионосферы (высоты более 230 км) — это направление на запад

для всех сезонов (рис. 2, а). Для нижней ионосферы наблюдается большая изменчивость направлений. Экспериментальные данные для высот 160–200 км мы не использовали для анализа высотно-временных распределений V_x и V_y (обозначена серым цветом на рис. 2, а, б), чтобы избежать ошибок интерполяции, поскольку на этот высотный интервал приходилось очень малое количество измерений. Это обстоятельство будет рассмотрено далее при анализе гистограмм распределений параметров, характеризующих движение неоднородностей ионизации в ионосфере.

Далее статистический анализ проводился отдельно для высот области E ионосферы (высоты до 120 км) и для высот области F ионосферы (высоты выше 120 км). Массивы экспериментальных данных составляли 11031 и 18554 измерения соответственно для E- и F-областей.

На рис. 3, 4 показаны многолетние временные вариации среднемесячных (сглаженных за три месяца) значений зональной (рис. 3, а; 4, а) и меридиональной компонент (рис. 3, б; 4, б) вектора скорости дрейфа ионизации в E- и F-областях. Здесь же показаны количества среднегодовых измерений (рис. 3, в; 4, в).

Отчетливо видно наличие устойчивых сезонных вариаций компонент горизонтальной скорости дрейфа неоднородностей ионизации на высотах E-области. Наблюдается большая изменчивость характера атмос-

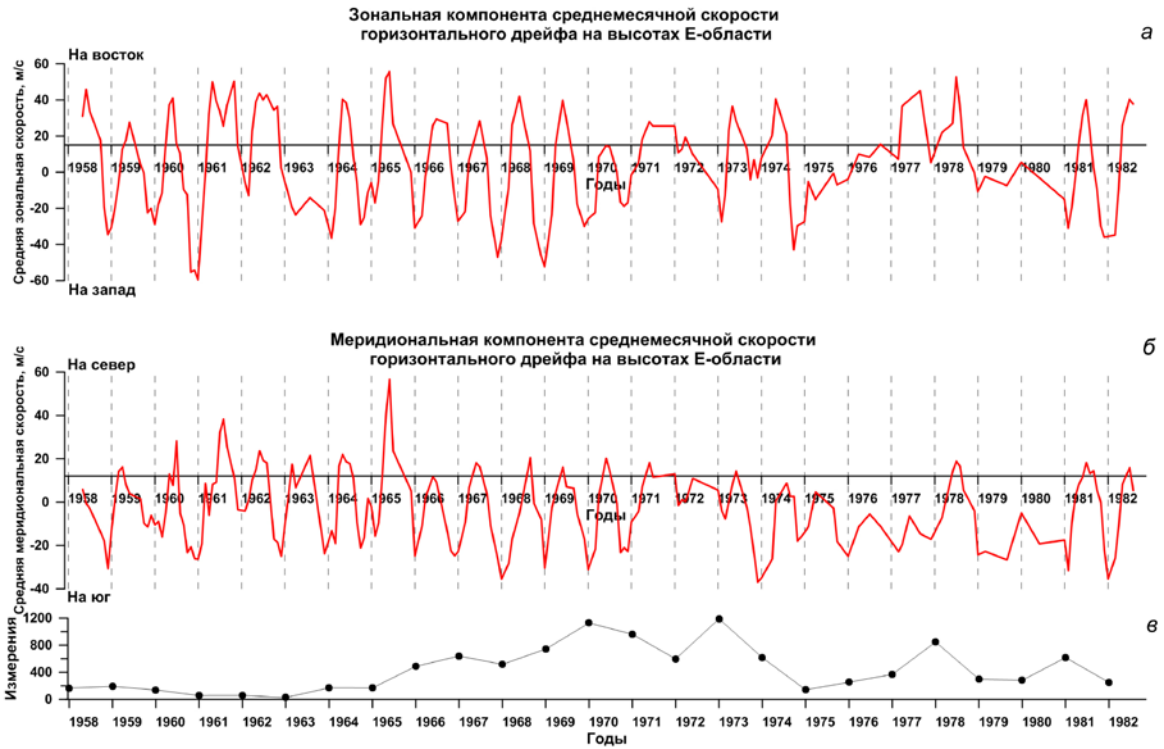


Рис. 3. Зональная (а) и меридиональная (б) компоненты (сглаженные за три месяца) среднemesячной скорости горизонтального дрейфа на высотах E-области; число среднегодовых измерений в E-области (в)

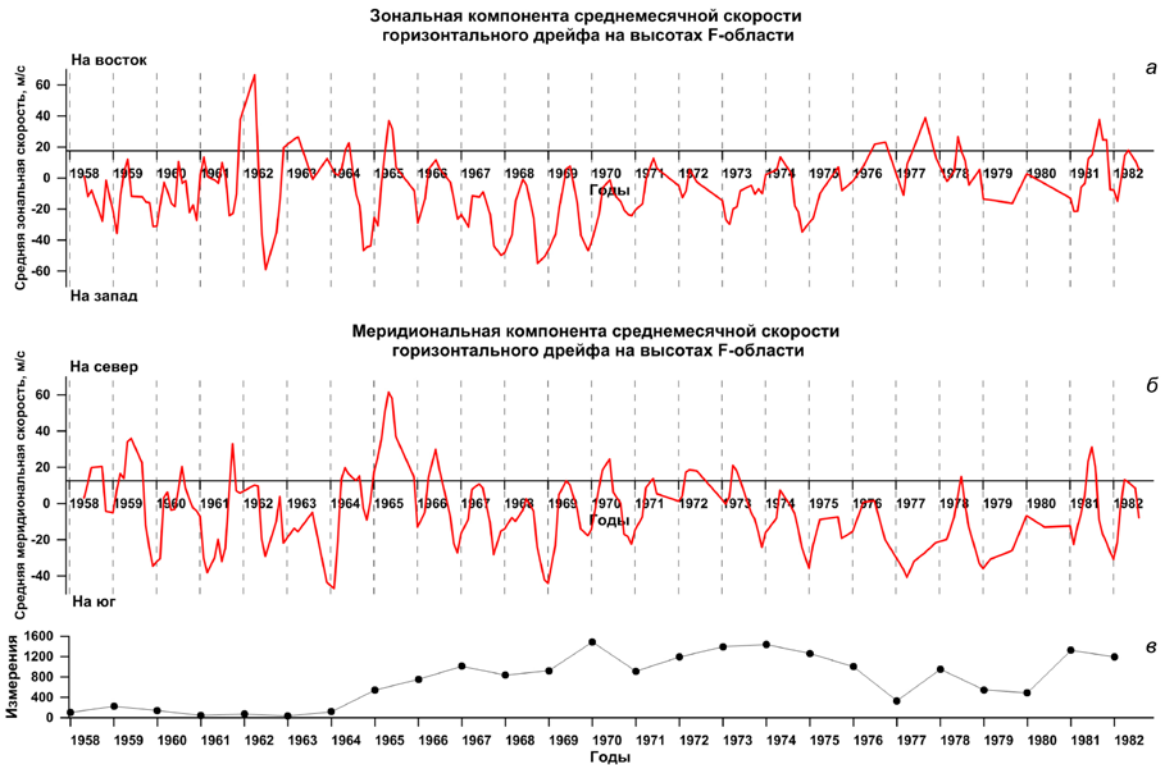


Рис. 4. То же для F-области

ферной циркуляции нейтрального газа на высотах нижней ионосферы. В E-области зимой преобладает движение неоднородностей ионизации на юго-запад (отрицательные величины V_x и V_y вдоль штриховых линий на рис. 3, а, б). Летом направление зональной компоненты V_x скорости горизонтального дрейфа

ионизации меняется на восточное (см. рис. 3, а). Преобладает направление на северо-восток, реже на юго-восток (1974–1977, 1979–1980 гг.) (см. рис. 3, б).

Вариации динамического режима на высотах F-области существенно другие. В верхней ионосфере уверенно преобладает зональное направление дви-

жения неоднородностей ионизации на запад для всех сезонов. Особенно хорошо это видно для лет, характеризующихся большим количеством экспериментальных измерений 1967–1976 гг. (рис. 4, а; см. также рис. 2, а). Меридиональная компонента скорости горизонтального дрейфа преимущественно имеет направление на юг (рис. 4, б). Таким образом, горизонтальный дрейф неоднородностей плазмы на высотах верхней ионосферы в целом направлен на юго-запад с преобладанием зонального направления.

На всех высотах ионосферы величины скоростей зимой выше, чем летом. Особенно ярко это проявляется для меридиональной компоненты (V_y — на юг) в Е-области (рис. 3, б), а также для обеих компонент (V_x — на запад; V_y — на юг) скорости горизонтального дрейфа ионизации в F-области (рис. 4, а, б). Размах сезонных вариаций величин зональной компоненты V_x в Е-области (зимой — на запад; летом — на восток) примерно одинаков (рис. 3, а).

На рис. 5, 6 показаны основные особенности статистических распределений параметров, характеризующих движение неоднородностей ионизации в ионосфере. Наиболее вероятные высоты отражения радиосигналов вертикального зондирования при измерении дрейфов в Е-области составляют 108–112 км (рис. 5, д). Основной объем данных измерений дрейфов в Е-области относится к высотному интервалу 96–120 км. Наиболее вероятные значения зональной и меридиональной компонент скорости дрейфа составляют $-40 \div -60$ м/с (рис. 5, а, б). Наиболее вероятное направление движения неоднородностей ионизации — на юго-запад (рис. 5, а, б). Это подтверждается распределением наиболее вероятных направлений (азимутов) вектора скорости $210^\circ\text{--}240^\circ$ (рис. 5, з) с величиной модуля вектора скорости дрейфа $60\text{--}80$ м/с (рис. 5, в), хотя движение неоднородностей ионизации в северо-восточном направлении также часто встречается (рис. 5, а, б, з).

На рис. 6, д показано, что наиболее вероятные высоты отражения радиосигналов вертикального зондирования при измерении дрейфов в F-области составляют 260–280 км. Основной объем данных измерений дрейфов в F-области относится к высотному интервалу 200–320 км. Обращает на себя внимание высотный интервал 120–140 км, на который приходится более 3500 измерений. По-видимому, высоты 120–160 км по своим общим динамическим свойствам ближе к высотам Е-области (рис. 5, д). На интервал высот 160–200 км приходится очень малое количество измерений. Возможно, это связано с техническими характеристиками используемой экспериментальной установки. Наиболее вероятные значения скорости дрейфа составляют $-50 \div -100$ м/с для зональной компоненты и $0 \div -50$ м/с — для меридиональной (рис. 6, а, б). Наиболее вероятное направление движения неоднородностей ионизации — на юго-запад (рис. 6, а, б). Это подтверждается распределением наиболее вероятных направлений (азимутов) вектора скорости $240^\circ\text{--}270^\circ$ (рис. 6, з) с величиной модуля вектора скорости дрейфа $80\text{--}100$ м/с (рис. 6, в). Движение неоднородностей ионизации

в северо-восточном направлении также часто встречается (рис. 6, а, б, з).

С использованием среднемесячных значений (среднее за каждый месяц всего периода наблюдений) зональной V_x и меридиональной V_y компонент скорости горизонтального дрейфа ионизации (сглаженные временные ряды показаны на рис. 3, а, б и рис. 4, а, б) были рассчитаны ежемесячные средние многолетние значения (нормы) компонент скоростей V_x и V_y и среднеквадратические отклонения отдельных измерений от средних. Таким образом, была получена многолетняя средняя годовая вариация зональной и меридиональной компонент скорости горизонтального дрейфа на высотах Е- и F-областей (рис. 7). Наибольшая статистика накоплена для зимних месяцев (декабрь, январь) при зондировании F-области — порядка 8000 измерений (см. рис. 7, е), летом измерений существенно меньше — ~3000. Обратная ситуация отмечается для высот Е-области: зимой измерений наименьшее количество — 1700, а летом наибольшее — более 4500. Основные характерные высотные и сезонные особенности динамического режима в Е- и F-областях, уже рассмотренные выше при обсуждении рис. 3–6, уверенно подтверждаются. Это преобладающее движение на запад (см. рис. 7, з) и на юг (рис. 7, д) для всех сезонов в верхней ионосфере. Для высот нижней ионосферы движение на восток преобладает летом, на запад — зимой (рис. 7, а). Меридиональная компонента уверенно показывает направление на юг для зимних месяцев (рис. 7, б). Для многолетних месячных средних норм компонент скоростей V_x и V_y подтверждается увеличение скоростей горизонтальных движений зимой по сравнению с периодами летнего солнцестояния и равноденствия (рис. 7, а, б, з, д).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Статистический анализ всего огромного массива архивной экспериментальной информации о динамическом режиме ионосферы 1958–1982 гг. ранее не выполнялся. Научный анализ проводился для отдельных сезонов или временных интервалов, корректируемых графиками совместных измерений в рамках всемирных научных программ (МГГ, МГС, МГСС), или для временных периодов проведения научных экспериментов по верификации используемого радиофизического метода D1 [Kazimirovsky et al., 1971; Kazimirovsky, 1976; Казимировский, Кокоуров, 1979]. Следует понимать, что в те годы весь процесс обработки экспериментальных данных и графического представления результатов научного анализа выполнялся вручную, был трудоемким и требовал много времени. Выполнить статистический анализ массива, содержащего почти 30000 измерений, было практически невозможно. Поэтому результаты ретроспективного статистического анализа являются новыми и чрезвычайно актуальными в настоящее время, несмотря на то, что анализируются

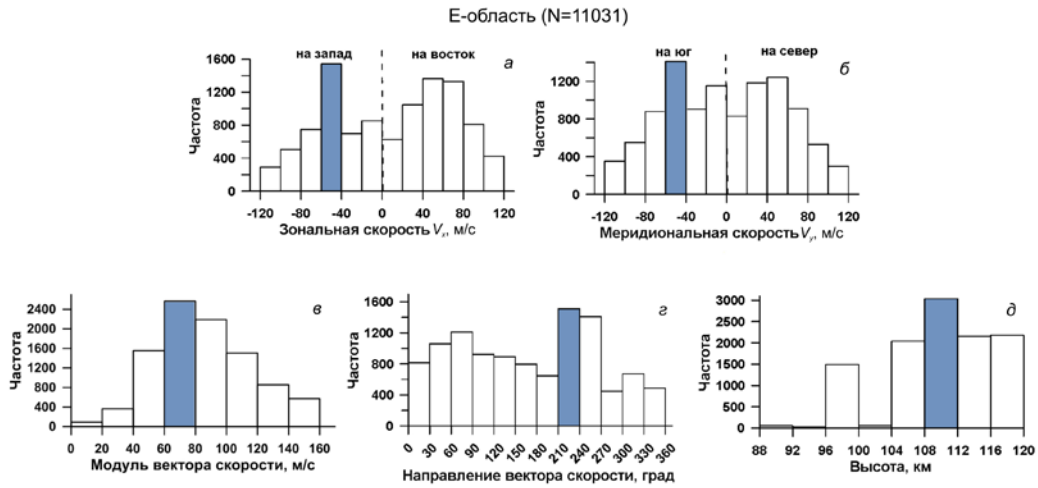


Рис. 5. Гистограммы распределения частот повторяемости значений зональной V_x (а) и меридиональной V_y (б) компонент, значений модуля (в) и направления (г) вектора скорости дрейфа неоднородностей ионизации, а также высоты отражения сигнала (д) для высот области Е

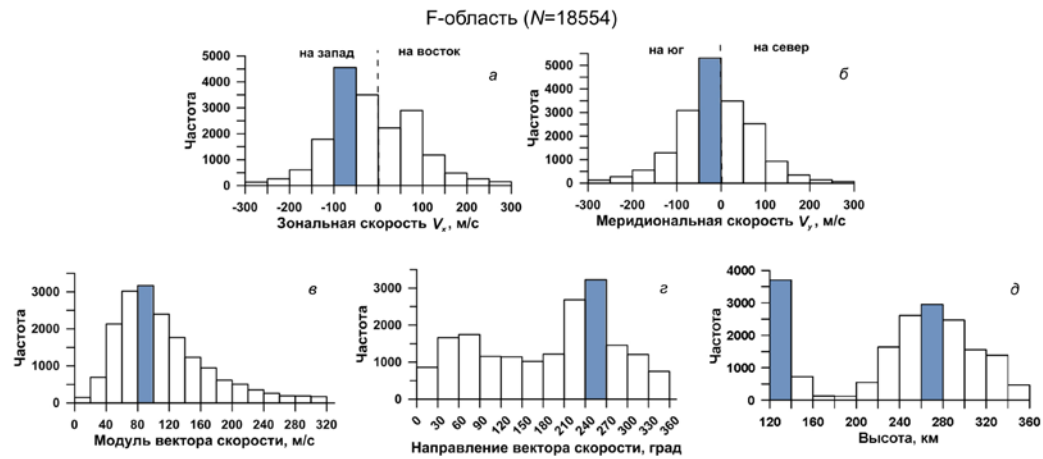


Рис. 6. Гистограммы распределения частот повторяемости значений зональной V_x (а) и меридиональной V_y (б) компонент, значений модуля (в) и направления (г) вектора скорости дрейфа неоднородностей ионизации, а также высоты отражения сигнала (д) для высот F-области

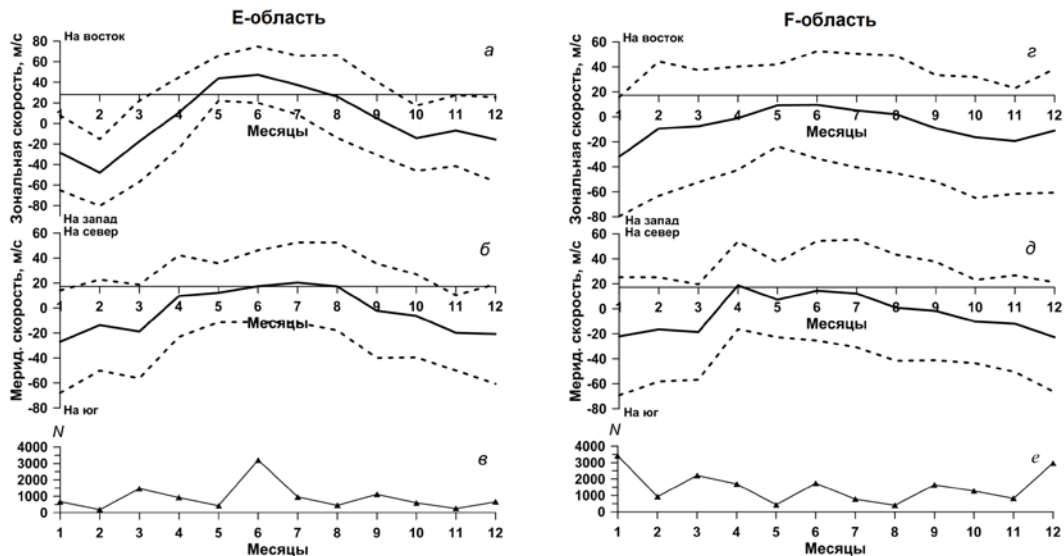


Рис. 7. Многолетняя средняя годовая вариация зональной (а, в) и меридиональной (б, д) компонент скорости горизонтального дрейфа (сплошные линии) и среднеквадратические отклонения (штриховые линии), а также общее число измерений для месяцев года на высотах Е- и F-областей (в, е)

давно полученные архивные экспериментальные данные. Статистические оценки представляют научный интерес, поскольку дают информацию о долгосрочных (климатических) нормах параметров движения ионизации на высотах E- и F-областей над регионом юга Восточной Сибири. Результаты представленного статистического анализа репрезентативны и достоверны, поскольку обрабатывался ряд наблюдений большого объема; анализируемые данные получены единым методом и обработаны по единой методике.

Следует отметить, что результаты настоящего ретроспективного статистического анализа не противоречат, а подтверждают и расширяют выводы, сделанные ранее в процессе непосредственного получения экспериментальных данных большим творческим коллективом научных сотрудников под руководством В.М. Полякова, В.Д. Кокоурова, Э.С. Казимировского. Теоретическая основа экспериментальных радиофизических измерений и полученные научные результаты были обобщены в научных монографиях [Поляков и др., 1968; Казимировский, Кокоуров, 1979]. Классическая методика пространственно-разнесенного приема радиосигналов, отраженных от ионосферы или прошедших сквозь ионосферу, часто используется в современных наблюдательных экспериментах для получения характеристик движений ПИВ.

Исследование ионосферных процессов представляет очень сложную задачу, поскольку ионосфера не является изолированной системой в классическом смысле. Будучи частью околоземного космического пространства, она тесно взаимодействует как с нижележащими слоями нейтральной атмосферы, так и с магнитосферой. И здесь существенную роль играют динамические и электродинамические процессы. Информация о региональных климатических особенностях динамического режима исследуемой области ионосферы бывает исключительно полезной, иногда просто необходимой, для понимания физики наблюдаемых вариаций изучаемых ионосферных параметров. Поэтому знание климатических норм динамических параметров и учет региональных особенностей динамического режима исследуемой области ионосферы являются весьма полезными, а в некоторых случаях — необходимыми условиями для понимания физики наблюдаемых вариаций изучаемых ионосферных параметров и корректного анализа экспериментальных данных, для верификации новых методов ионосферных наблюдений, для тестирования методик обработки экспериментальной информации. В настоящее время в отделе физики околоземного космического пространства ИСЗФ СО РАН продолжают экспериментальные измерения параметров движения неоднородностей ионизации и нейтрального газа на высотах ионосферы.

Дрейф ионосферной плазмы может рассчитываться на основе данных Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). В работе [Шпынев, 2000] представлен метод расчета дрейфа ионосферной плазмы вдоль луча зрения радара на основе ана-

лиза спектров мощности сигнала ИРНР. Затем был развит подход, учитывающий перенос ионосферной плазмы вдоль линий геомагнитного поля [Шпынев и др., 2010]. На его основе была исследована возможность использования данных ИРНР для анализа динамики и вариаций меридионального нейтрального ветра. Альтернативный метод на основе анализа автокорреляционных функций сигнала ИРНР представлен в работе [Щербаков и др., 2015; Shcherbakov et al., 2015].

Статистический анализ данных, полученных коротковолновым радаром в Екатеринбурге и радаром SuperDARN в Хоккайдо по параметрам среднемасштабных (СМ) ПИВ, представлен в работе [Oinats et al., 2016]. На высотах верхней ионосферы в ночное время преобладает юго-западное (азимут $\sim 210^\circ$) направление перемещения СМ ПИВ. По данным радара SuperDARN Хоккайдо наиболее вероятные значения дневных скоростей движения ПИВ составляют 60–100 м/с в E-области и 110–180 м/с — в F-области. По данным КВ-радаров в Екатеринбурге скорости движения ПИВ на высотах F-области составляют 30–90 м/с [Oinats et al., 2016]. Эти оценки скоростей дрейфа ионизации хорошо согласуются с результатами настоящего статистического анализа (см. рис. 5, 6).

Важным приложением исследований динамики ионосферных неоднородностей является возможность последующей модельной оценки скорости нейтрального ветра в исследуемой области ионосферы [Oinats et al., 2016; Толстикова и др., 2022]. Но здесь возникает отдельный сложный вопрос определения источника генерации наблюдаемых ПИВ. Чаще всего ПИВ выступают проявлением внутренних гравитационных волн (ВГВ) [Передалова, Ойнац, 2020], генерируемых либо в области аврорального овала во время геомагнитных бурь, либо в нижележащей нейтральной атмосфере в периоды возмущений метеорологического характера (внезапные стратосферные потепления; неустойчивости бароклинного типа, генерируемые в струйном течении в результате структурных трансформаций циркумполярного вихря; тропические циклоны и т. п.). Многолетние исследования показали, что в дневное время источником среднеширотных СМ ПИВ чаще всего являются ВГВ. Однако различные неустойчивости ионосферной плазмы также могут быть источником ПИВ [Передалова, Ойнац, 2020].

В работе [Толстикова и др., 2022] предложен универсальный метод оценки зональной и меридиональной скоростей нейтрального ветра по статистике наблюдений двумерного вектора фазовой скорости СМ ПИВ, полученных любым инструментом. Метод предполагает разделение наблюдаемых ПИВ на те, которые вызваны ВГВ, и на ПИВ другой физической природы. Для этого осуществляется проверка измеренных параметров СМ ПИВ на соответствие дисперсионному соотношению Хайнса, которое связывает волновой вектор и частоту ВГВ с известными параметрами среды распространения [Hines, 1960]. В случае выполнения дисперсионного соотношения применяется гипотеза фильтрации ВГВ нейтральным

ветром, согласно которой амплитуда ВГВ должна возрастать (убывать) при распространении антипараллельно (параллельно) направлению распространения нейтрального ветра. Если основными источниками СМ ПИВ являются ВГВ, временная динамика азимутов СМ ПИВ в течение суток должна определяться нейтральным ветром. При распространении ВГВ по ветру сильно уменьшается их амплитуда за счет диссипации, в то время как при распространении против ветра амплитуда увеличивается. Следовательно, вероятность наблюдения увеличивается для СМ ПИВ, распространяющихся в направлении, противоположном нейтральному ветру на высоте наблюдения. Напротив, в направлении, совпадающем с сильным нейтральным ветром, вероятность наблюдения СМ ПИВ значительно уменьшается. Таким образом, максимумы в распределении азимутов СМ ПИВ по времени должны совпадать с направлениями, противоположными азимутам наиболее сильных и часто встречающихся в этот сезон и это время суток ветров [Голстикова и др., 2022].

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование позволило получить среднестатистические многолетние характеристики дрейфа неоднородностей ионизации — так называемые фоновые характеристики горизонтальных ионосферных движений — над среднеширотным регионом юга Восточной Сибири и сформулировать следующие результаты.

1. Выполнен статистический анализ многолетнего архива (29585 значений) однородных измерений горизонтальных скоростей дрейфа ионизации на высотах Е- и F-областей вблизи Иркутска (52° N, 104° E) почти за 25 лет с апреля 1958 по ноябрь 1982 г. Анализировались отдельно Е-область (до 120 км; 11031 измерений) и F-область (выше 120 км; 18554 измерений).

2. В результате статистического анализа получены многолетние средние характеристики (годовые, сезонные, месячные) динамических параметров ионосферы, их повторяемость и изменчивость (размах вариаций, среднеквадратические отклонения).

3. Высотно-временные распределения зональной и меридиональной компонент V_x , V_y скорости дрейфа ионизации показывают, что движение в зональном направлении более регулярно, чем меридиональный дрейф.

4. Подтверждены явные различия в характере динамического режима нижней и верхней ионосферы. Под верхней ионосферой мы понимаем высоты F-области выше 200 км. Наиболее вероятные высоты отражения радиосигналов вертикального зондирования при измерении дрейфов в F-области составляют 260–280 км. Основной объем данных измерений дрейфов в F-области относится к высотному интервалу 200–320 км. Под нижней ионосферой мы понимаем высоты 120–160 км. Наиболее вероятные высоты отражения радиосигналов вертикального зондирования при измерении дрейфов в нижней ионосфере составляют 108–112 км и 120–140 км. Основной объем данных измерений дрейфов в ниж-

ней ионосфере относится к высотному интервалу 96–140 км.

5. Наиболее вероятное направление движения неоднородностей ионизации в нижней ионосфере — на юго-запад (азимуты вектора скорости 210° – 240°) с величиной модуля вектора скорости дрейфа 60–80 м/с. Часто встречается также движение неоднородностей ионизации в северо-восточном направлении. Наиболее вероятные значения зональной и меридиональной компонент скорости дрейфа составляют $-40 \div -60$ м/с.

6. Наиболее вероятное направление движения неоднородностей ионизации в верхней ионосфере — на юго-запад (азимуты вектора скорости 240° – 270°) с величиной модуля вектора скорости дрейфа 80–100 м/с. Движение неоднородностей ионизации в северо-восточном направлении также вероятно. Наиболее вероятные значения зональной компоненты скорости дрейфа составляют $-50 \div -100$ м/с и $0 \div -50$ м/с для меридиональной компоненты.

7. Для нижней ионосферы характерна высокая изменчивость скоростей движений. При этом статистический анализ позволяет четко выделять в нижней ионосфере сезонные вариации величины и направления скорости движения ионизации. Наблюдается большая изменчивость направлений, особенно зимой и в периоды равноденствия, по-видимому, связанная с сезонными перестройками характера атмосферной циркуляции нейтрального газа на высотах нижней ионосферы. В E-области зимой преобладает движение неоднородностей ионизации на юго-запад. Летом направление зональной компоненты V_x скорости горизонтального дрейфа ионизации меняется на восточное (преобладает направление на северо-восток, реже — на юго-восток).

На высотах верхней ионосферы наблюдается более регулярный динамический режим. Уверенно преобладает зональное направление движения неоднородностей ионизации на запад для всех сезонов (выше 230 км). Меридиональная компонента скорости горизонтального дрейфа преимущественно имеет направление на юг.

8. Величины скоростей зимой в целом выше, чем летом. Особенно ярко это проявляется в верхней ионосфере как для зональной (V_x направлена зимой на запад), так и для меридиональной (V_y направлена зимой на юг) компонент скорости горизонтального дрейфа ионизации. В нижней ионосфере эта закономерность выполняется для меридиональной компоненты (V_y направлена зимой на юг). Размах межсезонных вариаций величин зональной компоненты V_x в E-области (зимой — на запад; летом — на восток) примерно сопоставим.

Акцентируем внимание на выводах, сделанных ранее в монографии Казимировского и Кокоурова [1979] и ссылок в ней на многочисленные научные статьи, о том, что метод радиосигналов приема с малой базой дает количественную оценку нейтрального ветра на высотах нижней ионосферы (до ~ 130 км) и дрейфа среднемасштабных (~ 100 км) неоднородностей ионизации на высотах верхней ионосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта РНФ № 22-17-00146. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в части проведения

наблюдений и первичной обработки данных. Результаты получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Долговременные тренды в верхней атмосфере и ионосфере (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012. Т. 52, № 3. С. 291–312.
- 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](https://doi.org/10.31857/S0016794020040045).
- Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. *Движения в ионосфере*. Новосибирск: Наука, 1979. С. 68–97.
- 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.
- Петрухин В.Ф. Измерения горизонтальных дрейфов (метод D1). *Институт солнечно-земной физики: создание и развитие*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. С. 306–312.
- Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. *Ионосферные процессы*. Новосибирск: Наука, 1968. 535 с.
- Толстикова М.В., Ойнац А.В., Артамонов М.Ф. и др. 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](https://doi.org/10.12737/szf-84202208).
- Хабитуев Д.С., Черниговская М.А. Программа для визуального отображения и форматирования архивных данных вертикального зондирования ионосферы со станций Зуй и Бадары. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668610*. 2022.
- Шпынев Б.Г. Методы обработки сигналов некогерентного рассеяния с учетом эффекта Фарадея. *Диссертационная работа*. Иркутск, 2000. 142 с.
- Шпынев Б.Г., Жеребцов Г.А., Тащилин А.В. и др. Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным измерений на Иркутском радаре НР. *Солнечно-земная физика*. 2010. Вып. 16. С. 3–8.
- Щербakov А.А., Медведев А.В., Кушнарев Д.С. и др. Расчет нейтральных меридиональных ветров в средних широтах с помощью Иркутского радара НР. *Солнечно-земная физика*. 2015. Т. 1, № 3. С. 37–48. DOI: [10.12737/10962](https://doi.org/10.12737/10962).
- Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.* 1960. Vol. 38, no. 11. P. 1441–1481. DOI: [10.1139/p60-150](https://doi.org/10.1139/p60-150).
- Kazimirovsky E.S. E- and F-region ionospheric drift measurements and their significance for physics of the ionosphere. *Solar-Terr. Phys.* 1976. No. 1. P. 67–87.
- Kazimirovsky E.S., Kokourov V.D. The measurement of ionospheric drifts over East Siberia, USSR. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*. 1972. A. 271. P. 499–508.
- Kazimirovsky E.S., Kokourov V.D., Zakharov V.N., Jovty E.I. The simultaneous measurements of ionospheric drift by vertical and oblique sounding. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1971. Vol. 33, no. 6. P. 943–950.
- Kazimirovsky E.S., Zhovty E.I., Chemigovskaya M.A. Models for horizontal E- and F- region drifts. *Adv. Space Res.* 1994. Vol. 14, no. 12. P. (12)37–(12)38.
- 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. P. 211–255. DOI: [10.1007/s10712-005-3819-3](https://doi.org/10.1007/s10712-005-3819-3).
- Laštovička J. Long-term changes in ionospheric climate in terms of f_oF_2 (Review). *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 110. DOI: [10.3390/atmos13010110](https://doi.org/10.3390/atmos13010110).
- Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., et al. 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, Article Id. 8. DOI: [10.1186/s40623-016-0390-8](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0390-8).
- Rishbeth H. Long-term changes in the ionosphere. *Adv. Space Res.* 1997. Vol. 20, no. 11. P. 2149–2155. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00607-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00607-8).
- Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., et al. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120, no. 12. P. 10851–10863. DOI: [10.1002/2015JA021678](https://doi.org/10.1002/2015JA021678).
- URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 15 марта 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Хабитуев Д.С., Черниговская М.А. Ретроспективный анализ многолетних региональных особенностей динамического режима ионосферы над югом Восточной Сибири. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 83–92. DOI: [10.12737/szf-93202309](https://doi.org/10.12737/szf-93202309).