

МІНІСТЭРСТВА АДУКАЦЫІ РЭСПУБЛІКІ БЕЛАРУСЬ

БЕЛАРУСКІ ДЗЯРЖАЎНЫ ЎНІВЕРСІТЭТ

ГЕАГРАФІЧНЫ ФАКУЛЬТЭТ

Кафедра агульнага землярэзнаўства і гідраметэаралогіі

ХІТРЫКАЎ

Максім Аляксандравіч

**ДАСЛЕДВАННІ КАНВЕКЦЫЙНАЙ ВОБЛАЧНАСЦІ
І НАВАЛЬНІЦ З ВЫКАРЫСТАННЕМ МАДЭЛІ WRF**

Дыпломная работа

Навуковы кіраўнік:

кандыдат геаграфічных навук, дацэнт

Каўрыга Павел Антонавіч

Допущена да абароны

«__» _____ 2014 г.

Заг. кафедры агульнага землярэзнаўства і гідраметэаралогіі

Доктар геаграфічных навук, прафесар П. С. Лопух

Мінск, 2014

РЭФЕРАТ

Хітрыкаў М. А. Даследванні канвекцыйнай воблачнасці і навальніц з выкарыстаннем мадэлі WRF (дыпломная работа).

Мінск, 2013-2014 гг. – 89 старонак.

Пасля пастаноўкі мэты і задачай работы першым чынам былі разгледжаны тэарэтычныя матэрыялы па тэме. Быў праведзены агляд літаратурных крыніц па праблеме, была дадзена характарыстыка разглядаемым з’явам атмасферы ўвогуле і як фізічным працэсам у прыватнасці, і былі прыведзены звесткі пра лічбавае мадэляванне, сродкі візуалізацыі дадзеных і асноўны інструмент, які выкарыстоўваўся для выканання практычных заданняў – мадэль WRF. Далей увага была сканцэнтравана на рашэнні пастаўленых задачай. Яны разглядаліся ў адпаведнасці з парадкам, пазначаным ва Ўводзінах. Для іх выканання была распрацавана асобная метадыка, якая дазволіла зрабіць вынікі ўсіх чатырох разліковых заданняў рэпрэзентатыўнымі, а таксама параўнальнымі паміж сабой і са звесткамі спадарожнікавых вымярэнняў і назіраннямі прыземных метэастанцый – для задання па пошуку заканамернасцяў распаўсюджвання канвекцыйных воблакаў і навальніц па тэрыторыі Беларусі метадыка распрацоўвалася асобна. Пры правядзенні лічбавых эксперыментаў былі правяраны верагодныя залежнасці структуры канвекцыйных вочак ад неаднароднасцяў падсцілаючай паверхні для Беларусі і ад кліматычных паясоў. Была ажыццёўлена праверка крытэрыяў, якія выкарыстоўваюцца для выяўлення па ўскосным прыкметам навальнічных воблакаў сярод іншых канвекцыйных. Былі праведзены пошукі лепшай схемы параметрызацыі мікрафізікі для правядзення лічбавых разлікаў *Cumulis* і *Cumulonimbus*. Затым, на падставе атрыманых дадзеных, былі зроблены адпаведныя высновы, якія ў рэзюмаванай форме прадстаўлены ў Заключэнні. Неабходна адзначыць, што лепшых вынікаў пры прагназаванні надвор’я магчыма дасягнуць пры ўжыванні тых жа ўмоў, што былі пазначаны ў метадычнай частцы. Адвізуалізаваныя вынікі лічбавых разлікаў – карты і вертыкальныя разрэзы – прадстаўлены ў Дадатку да работы.

Бібліяграфія, 95 назв., 25 мал., 89 стар.

Хитриков М. А. Исследования конвективных облаков и гроз с использованием модели WRF (дипломная работа).

Минск, 2013-2014 гг., – 89 страниц.

После постановки цели и задач работы сначала были рассмотрены теоретические материалы по теме. Было проведено обозрение литературных источников по проблеме, была дана характеристика рассматриваемым явлениям атмосферы вообще и как физическим процессам в частности, и были приведены сведения про численное моделирование, средства визуализации данных и основной инструмент, применявшийся для выполнения практических заданий – модель WRF. Далее внимание было сосредоточено на решении поставленных задач. Они рассматривались в соответствии с порядком, указанным во Введении. Для их выполнения была разработана особая методика, которая позволила сделать результаты всех четырёх расчётных заданий репрезентативными, а также сравнимыми между собой и со сведениями спутниковых измерений и наблюдениями приземных метеостанций – для задания по поиску закономерностей распространения конвективных облаков и гроз по территории Беларуси методика разрабатывалась отдельно. При проведении численных экспериментов были проверены вероятные зависимости структуры конвективных ячеек от неоднородностей подстилающей поверхности для Беларуси и от климатических поясов. Была осуществлена проверка критериев, используемых для определения по косвенным признакам грозовых облаков среди прочих конвективных. Были проведены поиски лучшей схемы параметризации численных расчётов *Cumulis* и *Cumulonimbus*. Затем, на основании полученных данных, были сделаны соответствующие выводы, которые в резюмированном виде представлены в Заключение. Необходимо отметить, что лучших результатов при прогнозировании погоды можно достичь при использовании тех же условий, которые были определены в методической части. Визуализированные итоги численных расчётов – карты и вертикальные разрезы – представлены в Приложении к работе.

Библиография, 95 назв., 25 рис., 89 стр.

ABSTRACT

Khitrykau M. A. Convective clouds and thunderstorms researches using the WRF model (thesis).

Minsk, 2013-2014, – 89 pages.

After formulation of goals and objectives of the study, theoretical materials on the subject had been observed at first. Literary sources review, characteristic of the atmospherical phenomena in general and as physical processes in particular, information about numerical modeling, data visualization tools and the main tool used to perform practical tasks – WRF model – were given there. Further attention had been focused on solving the problems. They were considered in accordance with order set out in the Introduction. For their implementation special techniques had been developed. They allowed to make the result of all numerical experiments of the study representative and comparable with each other and with data of satellite measuring and observations of surface meteorological stations – for the search for patterns of convective clouds and thunderstorms spreading across territory of Belarus task techniques had been developed separately. During the carrying out of numerical experiments probable dependences of convective cells structure from inhomogeneity of underlying surface for Belarus and from climatic zones were tested. Testing of criteria, used to determine thunderstorms among other convective clouds by indirect signs had been made. Also search for the best microphysics parametrization scheme for Cumulus and Cumulonimbus modeling was implemented. Then, according to the obtained data, appropriate deductions were made, and had been summarized in Conclusion. It's necessary to note that the best results of weather forecasting can be achieved by using the same conditions that were identified in methodological part. Visualized results of numerical calculations – maps and vertical sections – would be placed in the Appendix to this work.

Bibliography, 95 names, 25 fig., 89 pages.

ЗМЕСТ

Уводзіны.....	6
Раздзел 1. Агляд літаратурных крыніц па праблеме.....	8
Раздзел 2. Матэрыялы, іх апрацоўка, метады аналізу і даследвання.....	13
2.1. Спадарожнікавыя даследванні канвекцыйных воблакаў і навальніц.....	21
2.2. Даследванні канвекцыйных воблакаў і навальніц у Беларусі.....	23
Раздзел 3. Канвекцыйныя воблакі і навальніцы як фізічныя з'явы атмасферы.....	24
3.1. Фарміраванне канвекцыйных воблакаў і іх развіццё.....	24
3.2. Электрычнае поле атмасферы.....	32
3.3. Працэсы электрызацыі канвекцыйных воблакаў і навальнічных з'явы.....	35
3.4. Прасторавае і часовае размеркаванне канвекцыйных воблакаў і навальніц на тэрыторыі Беларусі.....	44
3.5. Вочкавая арганізацыя канвекцыйных воблакаў і яе залежнасць ад падсцілаючай паверхні.....	48
3.6. Залежнасць структуры канвекцыйных вочкаў ад кліматычных умоў.....	55
3.7. Крытэрыі распазнавання навальнічных аблакаў.....	58
Раздзел 4. Лічбавы прагноз канвекцыйнай воблачнасці і навальніц.....	68
4.1. Лічбавае мадэляванне надвор'я і клімату.....	68
4.2. Мезамасштабная мадэль WRF і яе магчымасці для прагназвання.....	73
4.3. Параметрызацыя канвекцыйнай воблачнасці і навальніц.....	76
4.4. Здольнасць мадэлі WRF для засваення характарыстык канвекцыйнай воблачнасці і навальніц.....	78
Раздзел 5. Вынікі мадэлявання канвекцыйнай воблачнасці і навальніц.....	79
5.1. Візуалізацыя вынікаў мадэлявання.....	80
Заклучэнне.....	82
Спіс выкарыстаных крыніц.....	83
Дадатак.....	90

УВОДЗІНЫ

Напэўна, для чалавецтва за ўсю яго гісторыю не было больш страшнай і, разам з тым, таямнічай атмасфернай з’явы, чым навальніца. Грымоты, выбліскі маланак, ліўні, шквалы, град – усё гэта выклікала ў людзей глыбокую пашану, і выклікае зараз. І ўвесь час людзі імкнуліся растлумачыць, якая сіла спараджае такія магутныя абурэнні. Тысячагоддзямі лічылася, што гэта праявы моцы багоў, і толькі недзе з XVI-XVII стагоддзяў з’яўляюцца першыя спробы растлумачыць генэзіс навальніц з боку гледжання навукі. Але толькі ў сярэдзіне XVIII стагоддзя атрымлівае шырокае распаўсюджванне думка, што навальніца – гэта праява электрычных працэсаў у атмасферы. Вывучэнне канвекцыйных воблакаў – асяроддзя, у якім узнікаюць навальніцы – пачынаецца з XIX стагоддзя. Найбольшыя ж поспехі ў вобласці вывучэння канвекцыйных воблакаў і навальніц былі зроблены ў папярэднім стагоддзі.

Трэба адзначыць, што і зараз нашыя веды пра дадзеныя з’явы няпоўныя. Так, вядома, што канвекцыя ў атмасферы мае вочкавую будову, і воблакі развіваюцца згодна з ёй, што электрызацыя ўласціва ўсім воблакам, але дасягае найбольшага развіцця менавіта ў *Cumulonimbus*. Вядомы фактары, якія могуць уплываць на канвекцыю, асноўныя асаблівасці электрычных палёў атмасферы. Але невядома, як дакладна пэўны фактар уплывае на разглядаемы працэс. Дагэтуль не высветлена поўнасцю, як фазавыя пераходы ўплываюць на магутнасць і інтэнсіўнасць канвекцыі, як уплывае на гэта пачатак электрызацыі воблака, што з’яўляецца трыггерным механізмам маланкі.

Даследванні канвектывных воблакаў і навальніц з’яўляюцца вельмі актуальнай праблемай ужо доўгі час. Менавіта воблакамі вертыкальнага развіцця вызначаецца характар надвор’я ў цёплы перыяд года – у рэгіёнах, дзе тэмпературныя кантрасты паміж сезонамі не такія значныя (тропікі) яны вызначаюць надвор’е на працягу ўсяго года. Навальніцы і з’явы, з імі звязаныя – найбольш часты від неспрыяльных з’яў надвор’я, які наносіць значную шкоду. Таму неабходна працягваць вывучэнне гэтых феноменаў, каб удасканваць методыкі прагнозаў і распрацоўваць больш дзейныя меры для захавання людзей і гаспадаркі. І, у перспектыве, дакладныя веды пра ход працэсаў, рысы з’яў дапамогуць чалавецтву кіраваць імі.

Дадзеная работа – спроба зрабіць укладанне ў вобласць вывучэння навальніц і канвекцыйных воблакаў. У ёй будзе прыведзены агляд гісторыі даседванняў і літаратуры па галіне, расказана пра сучасныя накірункі і метады даследванняў – у тым ліку ў дачыненні да Беларусі. Пасля гэтага будзе прыведзена комплексная характарыстыка канвекцыйных воблакаў і навальніц як з’яў надвор’я разам з апісаннем працэсаў, што на іх уплываюць. Далей будзе размешчана характарыстыка лічбавых разліковых эксперыментаў – практычнай частцы работы. Разам з ёй будзе расказана пра само лічбавае мадэляванне і названы метады і сродкі, што выкарыстоўваліся пры ажыццяўленні разлікаў. У заключэнні будуць зроблены высновы, у першую чаргу пра магчымасці практычнага ўжывання вынікаў работы.

Мэта работы – правесці даследванне канвекцыйных воблакаў і навальніц, і на яго аснове ўдасканаліць методыку іх прагноза, заснаваную на выкарыстанні лічбавай мадэлі WRF, для тэрыторыі Беларусі. Дасягнута яна будзе шляхам рашэння наступных задач:

- Пошук статыстычных заканамернасцяў прасторавага і часовага размеркавання канвекцыйных воблакаў па тэрыторыі Беларусі;
- Пацверджанне ці аспрэчанне сцвярджэння аб тым, што на структуру канвекцыйнай вочкі ў навальнічным воблаке ўмовы падсцілаючай паверхні не ўплываюць;
- Пацверджанне ці аспрэчанне сцвярджэння аб тым, што структура канвекцыйных вочкаў не вызначаецца кліматычным поясам, у якім яна развіваецца;
- Праверка крытэрыяў, якія выкарыстоўваюцца для вызначэння навальнічных воблакаў сярод астатніх канвекцыйных, на разліках, зробленых для тэрыторыі Беларусі;
- Пошук лепшай схемы параметрызацыі мікрафізікі для ажыццяўлення лічбавых разлікаў канвекцыйных воблакаў і навальніц (дапаможныя разлікі).

Вынікі дадзенай работы могуць быць выкарыстаны пры кароткатэрміновых прагнозах навальніц і канвекцыйных воблакаў, зробленых з дапамогай мадэлі WRF.

РАЗДЗЕЛ 1. АГЛЯД ЛІТАРАТУРНЫХ КРЫНІЦ ПА ПРАБЛЕМЕ

Тэме канвекцыйных воблакаў і навальніц прысвечана вялікая колькасць работаў. Абсалютная большасць з іх была напісана ў апошнія стагоддзі, але першыя літаратурныя крыніцы пачалі з'яўляцца з сярэдзіны XVIII ст., калі былі праведзены першыя буйныя даследаванні атмасфернай электрычнасці. Гэта даклад “Слова аб з'явах паветраных, ад электрычнай сілы адбывалых” М. В. Ламаносава, зроблены ў 1753 г., і твор Б. Франкліна “Вопыты і назіранні над электрычнасцю”, напісаны ў першай палове 1750-х [58]. У іх прыводзяцца апісанні маланак як праяваў атмасферных электрычных працэсаў, даюцца іх асноўныя характарыстыкі, адзначаецца разбуральнасць электрычных разрадаў. На падставе гэтых работ былі распрацаваны і першыя сродкі для абароны ад удараў навальнічных разрадаў – маланкаадводы. Вялікую ролю ў дадзеных распрацоўках адыграў Б. Франклін. Далейшыя творы былі прысвечаны пераважна даследаванню электрычнасці з боку гледжання тэарэтычнай фізікі, даследаванню яе як адной з кіроўных сілаў – без дачынення да навальніц (Кулон, Максвел, Ом, Ампер, Вольт і інш.). З падобнага боку гледжання вывучаліся і асаблівасці рухаў – у тым ліку канвекцыйных – і ўзаемадзеянняў у газавым асяроддзі – даследаванні фізікі воблакаў пачынаюць праводзіцца толькі з канца XIX стагоддзя. Літаратурныя крыніцы таго перыяду, прысвечаныя менавіта даследаванням навальніц, утрымоўваюць пераважна інфармацыю пра ўдасканаленні сродкаў аховы ад гэтай неспрыяльнай з'явы [58].

Сітуацыя змяняецца ў першай палове XX стагоддзя: менавіта тады складаецца прынятая сёння карціна рухаў атмасфернага паветра як у глабальным, так і ў лакальным маштабах. У той час усталёўваюцца асаблівасці канвекцыйных рухаў у воблаках, іх асноўныя ўласцівасці і прычынна-выніковыя сувязі працэсаў. Праводзяцца першыя эксперыменты на лабараторных мадэлях атмасферы, па выніках якіх быў усталяваны шэраг характарыстык канвекцыі як працэса, якія потым пацвердзіліся дадзенымі назіранняў – напрыклад, зліццё вочкаў і шасцікантовая форма асобнай вочкі пры адсутнасці гарызантальных плыняў ветру. Вучоныя пачалі разумець, як функцыянуе канвекцыйнае воблака [71]. Што тычыцца літаратурных крыніц другой паловы XX стагоддзя, то на іх аказалі ўплыў два найвялікія тэхналагічныя прарывы: пачатак ужывання ШСЗ і развіццё вылічальнай тэхнікі, а разам з ёй – лічбавага мадэлявання. Новыя сродкі дапамаглі спрасціць вывучэнне складаных працэсаў і адкрылі магчымасць пачаць шэраг новых накірункаў. Асноўныя ўдасканаленні фізічнай карціны з'яў былі зроблены менавіта ў гэтыя дзесяцігоддзі. Але выяўленне чагосьці новага стала рэдкім – выбітным выключэннем з'яўляюцца толькі маланкі верхняй атмасферы, якія былі ўпершыню заўважаны ў 1989 годзе [7].

Адметнай рысай з'яўляецца тое, што абсалютная большасць матэрыялаў па тэме – як і дадзеных новых даследаванняў, так і інфармацыі пра практычнае ўжыванне – прадстаўлена ў выглядзе навуковых артыкулаў. Манаграфій,

падручнікаў, прысвечаных непасрэдна воблакам і атмасфернай электрычнасці, адносна няшмат. Так, у навучальных дапаможніках па фізіцы атмасферы, дынамічнай метэаралогіі і іншых курсах звесткі пра канвекцыйныя воблакі і атмасферную электрычнасць прадстаўлены толькі асобнымі главамі. Гэта тычыцца як старых [71], так і новых [7] падручнікаў.

З капітальных твораў магчыма адзначыць работы Дж. Чалмерса [51], Н. С. Шышкіна [68], І. П. Мазіна [69] і С. М. Шметэра [79]. Яны аб'яднаны агульнай вобласцю даследванняў воблакаў і атмасфернай электрычнасці, але тэмы работ розныя. Так, першая з названых работаў прысвечана толькі атмасфернай электрычнасці, другая – электрызацыі навальнічных воблакаў і, галоўнае, працэсам ападкаўтварэння ў іх, трэцяя – фізічным працэсам, якія выклікаюць утварэнне і ўплываюць на развіццё ўсіх тыпаў воблакаў, апошняя – толькі воблакам вертыкальнага развіцця, у ёй падрабязна разгледжваецца канвекцыя як працэс, характарыстыкі паветраных плыняў, а таксама ўзаемадзеянні паміж часцінкамі вільгаці ў канвекцыйных воблаках. У кожнай з іх немалую долю займае комплекснае абагульненне.

Работа Дж. Чалмерса “Атмасферная электрычнасць” уяўляе сабой сістэматызаваны збор звестак пераважна амерыканскіх даследчыкаў пра электрычныя працэсы ў атмасферы на сярэдзіну 1960-х гадоў. У пачатку кнігі каратка распавядаецца пра асноўныя электрычныя ўласцівасці атмасферы, і праводзіцца выдзяленне электрычнага поля навальнічных воблакаў з агульнага поля атмасферы. Далей гэтыя два віды палёў разглядаюцца асобна, але адзначаецца, што яны, фактычна, ствараюць адзіную сістэму, якая знаходзіцца ў стане раўнавагі і сама падтрымлівае ўласны баланс. Увогуле, пытанням балансу зарадаў і электрычнага патэнцыялу ў кнізе нададзена вялікая ўвага. Такасама гэта выдатная крыніца інфармацыі пра прылады вымярэння электрычных характарыстык атмасферы.

“Воблакі. Ападкі і навальнічная электрычнасць” Н. С. Шышкіна чымсці падобна да папярэдняй работы – гэта таксама абагульненне – але ў ім разглядаюцца ўкладанні вучоных з розных краін, і большую долю займае агляд пытанняў мікрафізіцы. Спачатку ў рабоце прыведзены агульныя звесткі пра разглядаемыя з'явы і кароткая гісторыя іх даследванняў. Далей жа пачынаецца фізічная характарыстыка ападкаўтварэння і электрызацыі. Найбольшую ўвагу аўтар надае апісанню працэсаў, што адбываюцца з вадкімі часцінкамі, у тым ліку шляху набыцця імі зараду. У ёй вельмі падрабязна разгледжаны ўсе асноўныя працэсы, якія ўплываюць на ападкаўтварэнне ў канвекцыйным воблаке.

Твор “Воблакі: будова і фізіка ўтварэння” І. П. Мазіна і С. М. Шметэра – адна з апошніх буйных работ па дадзенаму накірунку, напісаных у СССР. Хаця ў ёй і разгледжваюцца фізічныя працэсы, якія адбываюцца ў воблаках усіх відаў, але найбольшая ўвага нададзена воблакам вертыкальнага развіцця, бо менавіта яны адрозніваюцца найбольшай інтэнсіўнасцю, складанасцю ланцужкоў узаемасувязяў працэсаў, якія імі кіруюць – для воблакаў астатніх тыпаў яны больш простыя, таму ім увага адведзена крыху меншая.

“Фізіка канвекцыйных воблакаў” С. М. Шметэра стала адным з базісаў папярэдняй работы. Гэта збор звестак пра з’яву канвекцыі ў атмасферы і працы, з ёю злучаныя. У ім робіцца ўпор на фізічную трактоўку працэсаў – для свайго часу яна была выдатнай, а паколькі даследванні апошніх гадоў пераважнаносяць характар удакладненняў, то яна актуальна і сёння. У ёй таксама даволі добра разгледжвана і электрызацыя навальнічных аблакаў, у асаблівасці прычыны, што яе выклікаюць, але па значнасці на першым месцы ў гэтай рабоце стаіць мікрафізіка.

Акрамя дадзеных работаў магчыма назваць яшчэ твор І. С. Сцякольнікава “Вывучэнне маланак і навальніцаабарона” [58]. Гэта выдатная крыніца інфармацыі пра лабараторныя эксперыменты па вывучэнню маланак як электрычных іскраў – у папярэдніх работах такой інфармацыі амаль што няма – а таксама пра шкоду, якую могуць нанесці маланкі, і ахову ад іх.

Паколькі мэта дадзенай работы патрабуе выкарыстання сродкаў лічбавага мадэлявання, было праведзена азнаямленне з адпаведнай літаратурай. Асноўнымі крыніцамі інфармацыі сталі электронныя рэсурсы непасрэдна пра мадэль, якая будзе выкарыстоўвацца [88], а таксама творы, прысвечаныя характарыстыцы лічбавага мадэлявання ўвогуле [83,84].

Неабходна адзначыць, што на сённяшні дзень работы, прысвечаныя працам з лічбавымі сродкамі – адзін з галоўных, калі не галоўны, накірункаў даследванняў. Але даследванняў менавіта ў вобласці вывучэння канвекцыйных і навальнічных воблакаў, атмасфернай электрычнасці не так шмат – большасць артыкулаў адрозніваецца аднастайнай тэматыкай і прысвечана удасканаленню схемаў апісання рухаў паветра, мікрафізікі і параметрызацыі працэсаў. Да разглядаемай тэмы яны маюць ускоснае дачыненне.

Сярод работ, прысвечаных непасрэдна разглядаемай тэме, магчыма выдзеліць наступныя пераважныя накірункі: мадэляванне асобных выпадкаў, якія адрозніваліся нетыповасцю, ці магутнасцю праяўлення з’яў [9,62,63] і работы-параўнанні, дзе ажыццяўляюцца пошукі лепшых сродкаў для прыватнай мэты [50,64,77]. Таксама ёсць шэраг работаў статыстычнага характару [80], яны публікуюцца пераважна ў краінах СНД.

Работы, мэтай якіх з’яўляецца параўнанне якасці лічбавых сімуляцый розных мадэляў, звычайна будуюцца згодна наступнаму плану: спачатку абіраецца адзін ці некалькі выпадкаў выключных праяўленняў метэаралагічных з’яў, затым даецца характарыстыка метадаў, згодна якім будзе праводзіцца параўнанне – сюды ўваходзяць і звесткі пра абраныя параметры, далей апісваецца, як праводзіўся лічбавы разлік, і ў канцы прыводзяцца вынікі. Прыкладамі такіх работ з’яўляюцца артыкулы, дзе ажыццяўляецца параўнанне дынамічных ядзер мадэлі WRF (NNM і ARW), [64], дзе параўноўваюцца мадэлі WRF і MM5, і [50], дзе даследуюцца WRF і COSMO. Калі правесці іх абагульненне, то атрымаецца, што лепшай з усіх названых мадэляў будзе WRF-ARW, хаця і яна мае шэраг недахопаў – завышэнне колькасці ападкаў і не самыя дакладныя разлікі тэмператураў (так, нямецкая HRM дае больш якасныя вынікі).

Даследванні пэўных выпадкаў праяўленняў з’яў, якія не маюць сваёй мэтай пошук лепшых сродкаў прагнозу для прадбачання падобных выпадкаў у будучыні, звычайна грунтуюцца на выкарыстанні аднаго лічбавага сродка, але для ажыццяўлення задачы выкарыстоўваюцца розныя метады і схемы – усё для таго, каб атрымаць большую колькасць характарыстык, якія будзе магчыма выкарыстоўваць у далейшым. Да такіх работ магчыма аднесці артыкул [16]. Але згодна падобнаму плану праводзяцца і даследванні метэаралагічных умоў у рэгіёнах, пэўных паўтаральных сітуацый, якія патрабуюць больш глыбокага разумення і/ці ўдасканалення прагнозу. Добрым прыкладам з’яўляецца ацэнка магчымасці мадэлі WRF для прагноза надвор’я над Паўднёвым акіянам [6].

Статыстычныя працы звычайна праводзяцца пры кліматалагічных даследваннях – напрыклад, калі маецца неабходнасць высветліць сярэднія і экстрэмальныя значэнні колькасці выпадкаў, паўтаральнасці, забяспячэння атмасфернай з’явы, яе дысперсію, карэляцыі з іншымі характарыстыкамі і г. д. Але яны ажыццяўляюцца і падчас выключна метэаралагічных даследванняў – напрыклад, у артыкуле [80] прыводзяцца характарыстыкі навальніц і канвекцыйных вочкаў над тэрыторыяй Якутыі.

Значную групу складаюць верыфікацыйныя даследванні, якія маюць сваёй мэтай даць ацэнку якасці працы мадэлі ў розных, нярэдка складаных і нетыповых, умовах [28,31].

Вядомы факт, што сучасныя лічбавыя мадэлі надвор’я не маюць у сваім складзе блока, адказнага за разлік атмасфернай электрычнасці. Але паколькі праблема прадказання разрадаў маланак вельмі актуальная, то для падобных задачаў выкарыстоўваюцца ўскосныя сродкі. Згодна гэтаму даследванні па накірунку магчыма класіфікаваць на: работы, заснаваныя на дадзеных сістэм навальніцапеленгацыі [56] і радараў [58]. Ёсць яшчэ сродкі, але названыя два – асноўныя. Асобна каштуе выдзеліць артыкул [56], дзе апісаны метады дыягностыкі навальніц і электрычных разрадаў па дадзеных сістэмаў навальніцапеленгацыі і спадарожнікавых назіраннях.

Становяцца ўсё больш распаўсюджанымі спробы выкарыстаць новыя схемы як для ажыццяўлення лічбавых разлікаў, так і для аналізу атрыманых вынікаў. Адным з перспектыўных накірункаў з’яўляецца выкарыстанне сродкаў невыразнай логіцы (анг. “fuzzy logic”) – ад аналізу накірункаў ветра да прагнозу маланак [2].

Шэраг артыкулаў нельга аднесці да названых групаў, бо ў іх апісваюцца работы па пытаннях нетыповых, паднятых ўпершыню, унікальных. Яны рэдкія, але часцяком самы карысны і цікавы матэрыял змяшчаецца менавіта ў іх. Так, у артыкуле [23] разгледжваецца развіццё кучавых воблакаў на заходніх схілах Паўднёвых Андаў пад уздзеяннем катабатычных паветраных плыняў з Ціхага акіяна. Фактычна, гэта асобны выпадак праяўлення прымусовай канвекцыі, але з-за гэтага прымуса развіваюцца даволі вялікія канвекцыйныя воблакі, якія б у звычайных умовах пры аналагічных тэмпературах не ўзніклі б. У рабоце [38] разгледжваюцца ўласцівасці самаарганізацыі канвекцыйных воблачных сістэмаў. Даследчыкамі прапанаваны два шляхі яе ажыццяўлення: тэндэнцыя

насычэння з ростам утрымання вільгаці ў плыні і механізм, аналагічны гамеастазу ў жывых арганізмаў. Вельмі цікавая з’ява разгледжана ў артыкуле [3]: зацянялы эфект кавадлы навальнічнага воблака. Выяўлена, што з ростам плошчы кавадлы змяншаецца колькасць радыяцыі, якая паступае на паверхню. Такім чынам яна меней награвяецца, што, у сваю чаргу, выклікае зніжэнне інтэнсіўнасці канвекцыйных рухаў ажно да іх спынення (самаразбурэнне воблака). Праведзеная лічбавая сімуляцыя апынулася паспяховай. Работа [25] змяшчае звесткі пра выпадак пачатку электрызацыі ў піракучавым воблаке (канвекцыйным воблаке, якое ўтварылася ў патоках распаленага паветра, што ўздымаюцца над ляснымі ці стэпавымі пажарамі). Утварэнне такіх воблакаў назіраецца нярэдка, але звычайна яны невялікія па сваіх памерах, бо плыні узыходзячага паветра нязначныя. Дасягненне піракучавым воблакам узроўня крышталізацыі і пачатак электрызацыі – выпадак выключны. Цікавасць уяўляюць артыкулы, у якіх праводзіцца аналіз з’яваў, якія на тэрыторыі Беларусі і суседніх рэгіёнаў ці не сустракаюцца ўвогуле, ці вельмі рэдкія – такія, як работа [16]. У ёй разгледжваецца выпадак магутнай неспрыяльнай з’явы, уласцівай для Сярэдняга Захаду ЗША – так званых “дзірэча” (анг. “derecho”). Гэта магутныя супервочкавыя штормы, якія рухаюцца вельмі хутка, з-за чаго – а таксама з-за нахіленай ніжняй паверхні падобных воблакаў – у іх фронтальнай частцы фармуецца воблачная “завеса”, падобная да грэбня. Галоўнай тэмай работы было ўдасканаленне прагнозу падобных штармоў з дапамогай лічбавых тэхналогій.

Таксама падчас напісання дыплама часта выкарыстоўваліся электронныя сродкі, інфармацыі з сеткі Інтэрнэт (напрыклад, [87]), але часцей усяго яны служылі крыніцамі фактычнага матэрыялу, дадзеных для лічбавых разлікаў, а таксама сродкаў навочнага ўяўлення. У якасці крыніц тэарэтычнага матэрыялу яны выкарыстоўваліся нязначна.

РАЗДЗЕЛ 2. МАТЭРЫЯЛЫ, ІХ АПРАЦОЎКА, МЕТАДЫ АНАЛІЗУ І ДАСЛЕДВАННЯ

Для ажыццяўлення запланаваных работ была неабходна вялікая колькасць фактычных матэрыялаў: базавыя дадзеныя для лічбавых разлікаў, спадарожнікавыя карты і непасрэдныя дадзеныя метэаралагічных назіранняў, дадзеныя назіранняў (у тым ліку ўжо часткова апрацаваныя) для статыстычных работ, малюнкi і схемы. Усе яны браліся з розных крыніц і выкарыстоўваліся для розных мэтаў. Далей асноўныя асаблівасці выкарыстаных фактычных матэрыялаў і іх апрацоўкі будуць разгледжаны па групках па прызначэнню.

Пачнём з базавых дадзеных для правядзення лічбавых разлікаў. Для мадэлі WRF – зрэшты, як і для любой лічбавай – неабходна інфармацыя пра межавыя ўмовы (да дадзенай групы адносяцца звесткі пра падсцілаючую паверхню) і самі дадзеныя метэаралагічных назіранняў. Дадзеныя пра межавыя ўмовы былі ўзяты з электроннай крыніцы [90]. Яны ўяўляюць сабой БД па пунктах зямной паверхні, размешчаных па сетцы з кіламетровым крокам. Гэта ўжо падрыхтаваны і гатовы для ўжывання набор інфармацыі – у ім ужо ёсць звесткі пра вышыню пункта, нахіл паверхні, яе характар і інш. Далейшай апрацоўкі ён не патрабуе. Дадзеныя метэаралагічных назіранняў былі ўзяты з электроннай крыніцы [91]. Яны ўяўляюць сабой інфармацыю, атрыманую з глабальнай мадэлі GFS. Сродкі лічбавага мадэлявання ўспрымаюць інфармацыю толькі тады, калі яна структуравана па сетцы. Пункты метэаралагічных назіранняў гэтаму патрабаванню не адпавядаюць, таму выкарыстоўваецца спецыяльнае праграмнае забеспячэнне, якое ажыццяўляе інтэрпаляцыю дадзеных назіранняў на вузлы сетцы. GFS – адна з найбольш дасканалых падобных сістэм. Яна іныцыюецца кожныя шэсць гадзін і ажыццяўляе разлік: інтэрпаляцыю дадзеных і прагноз надвор'я на 192 гадзіны наперад. Для разлікаў, што будуць ажыццёўлены падчас гэтай работы, выкарыстоўваліся непасрэдна інтэрпаляваныя дадзеныя метэаназіранняў. Тыповы іх выгляд – grib-файл, у якім у кадаванай форме прадстаўлены звесткі па больш чым сотне метэаралагічных параметраў (геапатэнцыяльнай вышыні, атмасфернаму ціску, хуткасцям і накірункам ветру на ўзроўнях, тэмпературах на ўзроўнях, утрыманню вільгаці, характарыстках трапапаўзы і інш.), з якіх магчыма выбраць патрэбныя і для разглядаемай тэрыторыі. Разглядаемыя з'явы належаць да катэгорыі мезамасштабных, таму выкарыстоўваўся найбуйнейшы магчымы крок – $0,5^\circ$. Ажыццёўленыя разлікі ўяўляюць сабой мадэляванне мінулых падзей, таму для кожных сутак выкарыстана па 5 файлаў (ад поўначы да поўначы). Фактычна, гэта будзе інтэрпаляцыя на яшчэ буйнейшы маштаб.

Для ацэнкі якасці вынікі лічбавых разлікаў неабходна параўнаць з дадзенымі рэальных метэаралагічных назіранняў. У мэтах большай дакладнасці для гэтага будуць выкарыстаны дадзеныя двух відаў: непасрэдныя матэрыялы метэаралагічных назіранняў, узятыя ў архівах РГМЦ Беларусі і з электроннай крыніцы [93], а таксама спадарожнікавыя карты, атрыманыя з дапамогай сродка [86]. Так было зроблена таму, што, па-першае, паказчыкі, якія выдае мадэль

WRF па сканчэнні разліку, не заўсёды супадаюць з тымі, што вымяраюцца на пунктах назірання, а, па-другое – на тэрыторыі Беларусі амаль што не праводзяцца аэралагічныя вымярэнні, так што цяжка атрымаць дадзеныя для вышынных узроўняў. Так, з базаў дадзеных РГМЦ магчыма атрымаць звесткі пра тэмпературы паверхні і прыпаверхневага слоя паветра, адносную вільготнасць, дэфіцыт кропкі расы, хуткасць і накірунак ветру ў дадзеным слаі, але нельга атрымаць дадзеныя пра суадносіны сумесяў розных часцінак вільгаці – а гэта важны паказчык для ідэнтыфікацыі воблакаў. Але, нягледзячы на гэта, па іх магчыма меркаваць аб магутнасці канвекцыі і праводзіць ацэнку якасці лічбавага разліка. Яны будуць брацца па тэрмінах. Спадарожнікавыя карты сістэмы Giovanni будуць служыць сродкам для параўнання па значэннях на вышынных узроўнях, а таксама па характарыстыках трапапаўзы. Увогуле дадзеная крыніца прапануе карыстачам інфармацыю са значнай колькасці ШСЗ, якія належаць NASA, але для мэтай даследвання была абрана інфармацыя з дзвюх спадарожнікавых сістэмаў: AQUA/AIRS і MODIS. Прылады, размешчаныя на іх, дазваляюць вымяраць тэмпературу і ціск на верхняй мяжы воблакаў, розныя паказчыкі ўтрымання вільгаці ў паветры, геапатэнцыяльныя вышыні, ступень пакрыцця воблакамі – прыдатныя для параўнання параметры. Але гэтыя звесткі маюць адзін недахоп: яны не імгненныя, а асярэдненыя за прамежкі ў 12 ці 24 гадзіны. Такія абставіны ўскладняць параўнанне, зрабляць яго менш рэпрэзентатыўным, але сістэма Giovanni была адзінай крыніцай даступнай інфармацыі (іншыя сродкі – платныя, інфармацыя з іх каштуе вельмі дорага).

Адна з пастаўленых у рабоце задач складаецца ў пошуку заканамернасцяў прасторава-часовага размеркавання канвекцыйных воблакаў і звязаных з імі навальніц па тэрыторыі Беларусі. Для гэтага патрэбны масівы статыстычнай інфармацыі. Іх крыніцамі сталі электронныя архівы РГМЦ і сайта [93]. Прычынамі падобнага сталі больш шырокі і зручны доступ да звестак, якія дае сайт, і неабходнасць выкарыстання розных відаў зыходных дадзеных. Так, БД [93] змяшчае архіў рэальных метааналізаў па тэрмінах за перыяд з 2005 г. (для шэрагу станцый – з больш позняга тэрміну). Менавіта на яго аснове была зроблена выбарка інфармацыі для ацэнкі размеркавання воблакаў па тэрмінах, сутках і сезонах. Яна скаладалася з паказчыкаў відаў воблакаў, вышыні іх ніжняй мяжы, наяўнасці выпадзення ападкаў і/ці навальніцы ў тэрмін, таксама адзначаўся сам тэрмін і дата, калі адзначаліся канвекцыйныя воблакі. З архіваў РГМЦ была ўзята ўжо часткова апрацаваная інфармацыя: сярэднемесячныя значэнні паўтаральнасці розных відаў воблакаў, колькасць пахмурных дзён, колькасці дзён з ападкамі, іх від і працягласць. Гэтыя характарыстыкі былі выкарыстаны для атрымання шматгадовых сярэдніх.

Навочны матэрыял браўся з самых розных крыніц, якія ў абсалютнай большасці выпадкаў супадалі з крыніцамі тэарэтычнага матэрыялу. Ён браўся ці непасрэдна з файла – калі выкарыстоўвалася электронная крыніца – ці пераводзіўся у электронны від з друкаванай крыніцы, пасля чаго месціўся ў рабоце.

Перад разгледжваннем metodyкі працаў, неабходна пазначыць, згодна якому плану пабудавана сама дыпломная работа. Яе магчыма падзяліць на дзве вялікія часткі: тэарэтычную і практычную. Тэарэтычную частку, у сваю чаргу, магчыма разбіць на чатыры падчаскі: агульныя звесткі па праблеме, куды ўваходзіць агляд літаратурных крыніц, метадычная частка, у якой разгледжваецца спосабы выканання работ, фізіка-геаграфічная характарыстыка разглядаемых з’яў, і, асобна, звесткі пра лічбавае мадэляванне. У практычнай частцы магчыма выдзеліць сем падчастак: уласна задачы, што была пастаўлены, апісанне выканання работ і аналіз атрыманых вынікаў.

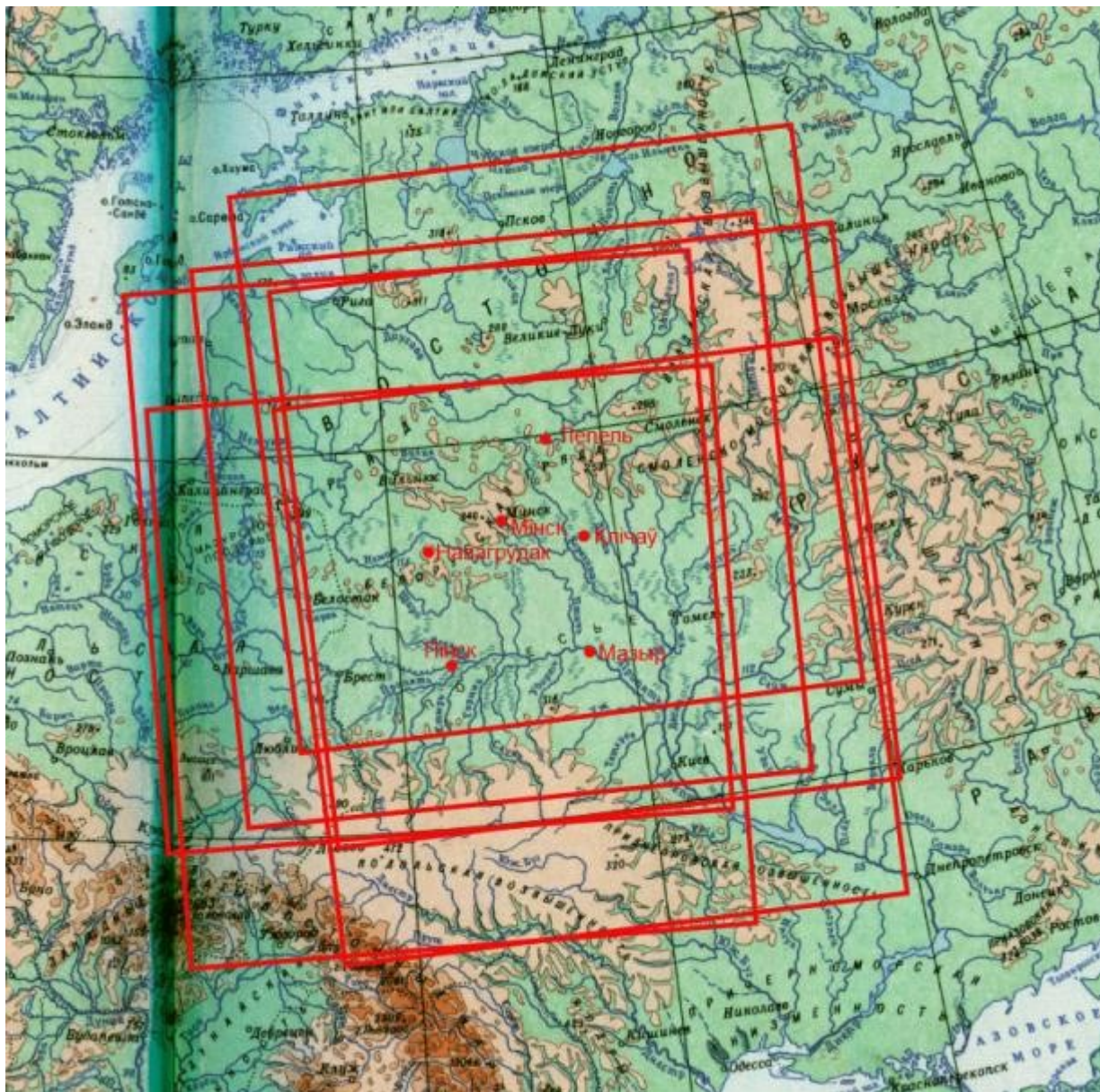
Спачатку разгледзем тэарэтычную частку. Як ужо ўзгадвалася, галоўнай крыніцай тэарэтычнага матэрыялу сталі навуковыя артыкулы, таму праблема metodyкі адбора больш актуальна менавіта для іх. Выкарыстоўваўся наступны алгарытм. Спачатку звярталася ўвага на накірунак даследвання. Калі работа была прысвечана ці канвекцыйным воблакам, ці навальніцам, ці маланкам, а сродкі лічбавага мадэлявання ў іх выкарыстоўваліся як інструменты, то такія артыкулы ішлі ў першай чарзе. Але не ўсе яны разгледжваліся – напрыклад, з-за неўжывальнасці не браліся даследванні, якія праводзіліся для тропікаў. З артыкулаў, прысвечаных менавіта лічбавым сродкам мадэлявання, адбіраліся тыя, што былі прысвечаны распрацоўцы і верыфікацыі схемаў параметрызацыі канвекцыі, мікрафізікі, а таксама работам-спробам мадэлявання разрадаў маланак. Капітальныя работы выкарыстоўваліся амаль цалкам, але шэраг матэрыялаў быў апушчаны – напрыклад, звесткі па ападках з манаграфіі [68] і звесткі пра фізіку неканвекцыйных воблакаў з кнігі [69].

Пры разгледжванні практычнай частцы неабходна звярнуць увагу на тое, што задача пошуку прасторава-часавых заканамернасцяў размеркавання вылучаецца з іншых, бо не звязана са сродкамі лічбавага мадэлявання, а астатнія чатыры маюць цэлы шэраг агульных рысаў. Лічбавыя разлікі з’яўляюцца асноўным накірункам работы, таму спачатку будуць разгледжаны яны. Першым чынам патрэбна адзначыць, што гэтыя разлікі – для забеспячэння параўнальнасці і рэпрэзентатыўнасці – былі праведзены па аднолькавай схеме: разліковы тэрмін складаў адны суткі (калі фіксавалася з’ява), памер разліковага дамена складаў 250 на 250 пунктаў, укладзеныя дамены не выкарыстоўваліся, прасторавы крок сеткі – 3,3333 км, часавы крок – 20 с, зона “згашэння ўплыву” межаў дамену – 5 пунктаў, схемы параметрызацыі радыяцыі і схемы-апісанні паверхні Зямлі і межавых слаёў – стандартныя, усталяваныя па змаўчанні (RRTM і NCER адпаведна), верхняя мяжа – узровень 50 гПа, параметрызацыя канвекцыі не выкарыстоўвалася. Схемы параметрызацыі мікрафізікі залежылі ад задачы. Вопыт папярэдніх работ паказаў, што ўсталяваныя па змаўчанні схемы параметрызацыі радыяцыі і апісанні межавых умоў даюць добрыя вынікі для разлікаў па тэрыторыі Беларусі, таму яны не змяняліся. Прасторавы крок можа падацца вялікім, але для выяўлення навальнічных аблокаў ён дастатковы – гарызантальныя памеры *Cumulonimbus* у 2-5 разоў большыя. Раней планавалася выкарыстоўваць крок у 1 км, але пробны паказалі, што гэта выклікае ўскладненне разліку і большыя памылкі.

Зараз разгледзім асобныя рысы методыкі выканання практычных работаў. Так, для задачы пошука лепшай схемы парметрызацыі мікрафізікі для разлікаў былі абраны два выпадкі навалініц: 14 жніўня 2012 года ў Лепелі і 23 ліпеня 2012 года ў Пінску. Прычыны такога выбару наступныя: па-першае, гэта ўнутрымасавыя навалініцы – як сведчыць параўнанне са спадарожнікавымі картамі, – таму выключаецца ўплыў прымусовага пад’ёму, які характэрны фронтальным навалініцам, і канвекцыйная вочка становіцца больш падобнай да тыповай; па-другое, разглядаемыя метэастанцыі знаходзяцца ў невялікіх і адносна невялікіх гарадах – гэта дазваляе выключыць іх ацяпляльны ўплыў, які можа паўплываць на развіццё вочкаў. Адзін з пазначаных выпадкаў будзе асноўным (Лепель), другі (Пінск) будзе служыць дадаткам для мэтай удакладнення і праверкі. Калі вынікі разлікаў па асноўнаму выпадку будуць дастаткова паказальнымі, аналіз разлікаў для дадатковага выпадку праводзіцца не будзе. Усяго для кожнага выпадка будзе праведзена дзесяць эксперыментаў, падчас якіх будзе выкарыстана пяць самых дакладных і дасканалых схемаў парметрызацыі, што ёсць на сённяшні дзень: Годарда (№7), Томпсана (№8), Мілбрандта-Яу (№9) і схемы NSSL (№17 і №18 – адрозніваюцца тым, што апошняя дазваляе прадказваць развіццё ядзеркандэнсацыі) з і без актывізацыі функцыі дэмпфавання, якая адказная за ўлік адбівання хваляў ад запіраючага ўзроўня. Візуалізаваныя вынікі разлікаў будуць параўнаны са спадарожнікавымі картамі і дадзенымі рэальных метэаралагічных назіранняў, пасля чаго будзе зроблена адпаведная выснова.

Для задачы пацверджання ці аспрэчання сцвярджэння аб тым, што структура канвекцыйнай вочкі ў навалінічным воблаке не залежыць ад умоў падсіцлаючай паверхні, было абрана пяць выпадкаў навалініц: дзве ужо названыя, а таксама навалініцы 19 ліпеня ў Мазыры, 21 жніўня ў Клічаве і 6 жніўня ў Навагрудку за 2012 год. Першы прынцып выбару метэастанцый супадае з другім для папярэдняга задання, другі – адбор пунктаў назірання, якія найбольш рэпрэзентатыўна прадстаўляюць рэгіёны з адрознымі фізіка-геаграфічнымі ўмовамі: Лепель – Паазер’е, якое адрозніваецца няроўнасцю рэльефа, наяўнасцю мноства азёраў, стракатым і неаднародным характарам паверхні; Навагрудак – Нёманская нізіна і Беларуская града, якія таксама адрозніваюцца няроўным рэльефам, але з меншымі, чым на Паазер’і ухіламі, але большым перападам вышыняў, і таксама неаднароднай паверхняй; Клічаў – раўніны Цэнтральнай і Ўсходняй Беларусі, якія адрозніваюцца больш аднародным характарам паверхні і роўным рэльефам; Пінск – заходняе Палессе, якое адрозніваецца адносна роўным рэльефам, але стракатай паверхняй і самай вялікай у рэспубліцы колькасцю балотаў; Мазыр – усходняе Палессе, рэгіён з найбольш аднародным на Беларусі рэльефам і даволі аднародным характарам паверхні (у выбары двух пунктаў на Палесіі адыграла сваю ролю і заўважная розніца ў кліматах рэгіёнаў). Неабходна адзначыць, што іншыя тры навалініцы – фронтальныя. Падчас папярэдніх даследаванняў [7] было ўсталявана, што розніца ў структурах вочкаў паміж унутрымасавой і фронтальнай навалініцамі нязначная, таму ёю можна знядбаць. Пацверджанне

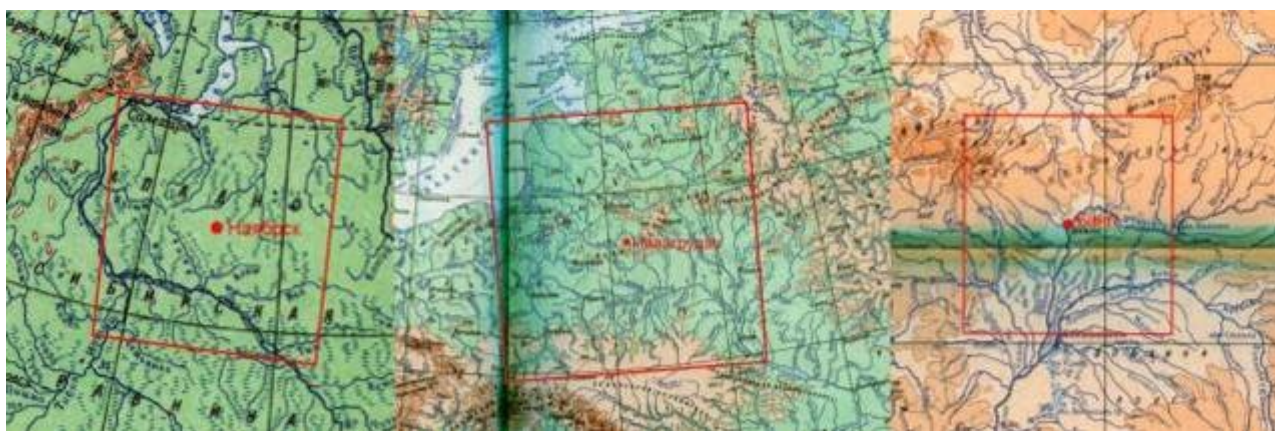
ці аспрэчэнне сцвярджэння будзе ажццёўлена шляхам стараннай візуалізацыі вынікаў лічбавых разлікаў і іх параўнаннем паміж сабой – для гэтай задачы дадзеныя непасрэдных метэаназіранняў не гэтак важны. Для разлікаў будзе выкарыстана схема Томпсана (без дэмпфавання) для параметрызацыі мікрафізічных працэсаў, якая лічыцца найбольш распрацаванай на сённяшні дзень. Месцазнаходжанне станцый і разліковых даменаў для дадзенага і папярэдняга задання магчыма адлюстраваць з дапамогай наступнай карты:



Мал. 2.1. Месцазнаходжанне разліковых даменаў для заданняў №1 і №2 (разам з разліковым даменам для Мінска для задання №4).

Задача пацверджання ці аспрэчэння сцвярджэння аб тым, што кліматычныя паясы не ўплываюць на структуру канвекцыйнай вочкі, увогуле падобна да папярэдняй. Адрозненні складаюцца ў тым, што пры выбары выпадкаў для разгледжвання кіроўным быў адзін прынцып, які выцякае непасрэдна з

фармуліроўкі задання. Таму былі абраны выпадкі навальніц у Наябрску 27 ліпеня 2013 года і Бангі 23 верасня 2013 года, а таксама – для выяўлення магчымых адрозненняў ад навальніц, што праходзяць над тэрыторыяй Беларусі – у Навагрудку 6 жніўня 2012 года. Усе абраныя метэастанцыі знаходзяцца на раўнінах, так што перашкодаў для ажыццяўлення параўнання няма. Выкананне задачы будзе ажыццёўлена шляхам параўнання візуалізаваных вынікаў лічбавых разлікаў для гэтых станцый, якія знаходзяцца ва ўмераным кантынентальным, блізкім да субарктычнага, экватарыяльным і умераным пераходным кліматах адпаведна – такім жа чынам, што і папярэдняе заданне. Выкарыстаная схема параметрызацыі мікрафізікі – схема Томпсана з адключанай функцыяй дэмпфавання. Месцазнаходжанне абраных метэастанцый і разліковых даменаў наступнае:



Мал. 2.2. Месцазнаходжанне разліковых даменаў для задання №3.

Задача праверкі крытэрыяў, якія выкарыстоўваюцца для выяўлення навальнічных воблакаў сярод іншых канвекцыйных, патрабуе найбольш стараных разлікаў, візуалізацыі і параўнання – прычым як паміж сабой, так і з дадзенымі назіранняў. Для ажыццяўлення гэтага задання былі абраны два выпадкі навальніц ў летні перыяд, два выпадкі назірання кучава-дажджавых аблакаў, у якіх не развілася навальніца, у летні перыяд і адзін выпадак навальніцы зімою. Менавіта такім выбар выпадкаў для разлікаў павінен быць з-за таго, што зімовыя і летнія навальніцы маюць шэраг адрозненняў (памеры вочак, суадносіны часцінак розных фаз і, такім чынам, розныя магчымасці для набыцця зараду), і таму шэраг крытэрыяў можа не падыйсці. Паколькі навальніцы ў халодны перыяд года рэдкія, а таксама ў сілу некаторых абмежаванняў пры пошуку, была абрана толькі адна падзея зімовай навальніцы. У якасці летніх навальніц былі абраны тыя ж выпадкі, што і для першага задання – па тым жа прычынам. Выпадкі назірання кучава-дажджавых аблакаў без навальніцы – 17 ліпеня 2012 года для Лепеля і 31 ліпеня 2013 года для Пінска. Выпадак зімовай навальніцы – 23 лютага 2008 года ў Мінску (на разглядаемых станцыях за апошнія гады – на якія мадэль GFS можа даць дадзеныя – яны не фіксаваліся). Лічбавыя разлікі будуць праводзіцца з ужываннем схемы параметрызацыі №8 без дэмпфавання. Іх вынікі будуць

візуалізаваны, а затым параўнаны паміж сабой і з дадзенымі прыземных і спадарожнікавых назіранняў. Пасля будучь зроблены высновы пра магчымасць ўжывання названых раней крытэрыяў для дыягностыкі навальнічных аблокаў. Таксама – па магчымасці – яны будучь дапоўнены.

Выкананне задачы па пошуку статыстычных заканамернасцяў прасторава-часовага размеркавання будзе праходзіць у два этапы: спачатку па матэрыялах крыніцы [93] будучь разлічаны характарыстыкі сезонныя і гадавыя, затым на аснове дадзеных архіваў РГМЦ будучь разлічаны шматгадовыя характарыстыкі. Неабходна адзначыць, што выбаркі станцый, матэрыялы якіх былі выкарыстаны для ажыццяўлення задання, для кожнага этапа былі адрознымі. Так, для першага этапа былі абраны шэсць станцый, і для кожнай з іх было прааналізавана па аднаму году метэаралагічных назіранняў: Баранавічы – за 2012, Лепель – за 2011, Пінск – за 2010, Васілевічы – за 2009, Клічаў – за 2008, Лынтупы – за 2007. Такая неаднародная выбарка была зроблена для таго, каб паказаць, што для тэрыторыі Беларусі, нягледзячы на яе даволі вялікую плошчу, па прычыне адносна невялікіх адрозненняў у характары паверхні паміж рэгіёнамі, характарыстыкі размеркавання на розных станцыях будучь падобныя. Таксама неабходна адзначыць, што спачатку планавалася выкарыстаць матэрыялы назіранняў па станцыях, абраных для другога задання, але дадзеныя па станцыі Навагрудак у крыніцы былі няпоўныя, таму яны былі заменены на блізкія па ўмовах Баранавіч і Лынтупы; таксама замест Мазыра былі выкарыстаны дадзеныя назіранняў у суседніх і блізкіх Васілевічах, паколькі яны з’яўляюцца больш падрабязнымі. Падчас апрацоўкі былі падлічаны такія характарыстыкі як агульная колькасць тэрмінаў назіранняў канвекцыйных і звязаных з імі воблакаў, колькасць назіранняў асобных відаў воблакаў, колькасць выпадкаў назірання воблакаў з ападкамі агульная і па відах, колькасць выпадкаў назірання навальніц, сярэдняя воблачнасць, сярэдняя вышыня ніжняй мяжы і сярдні тэрмін. Гэта было зроблена для цёплага (красавік-кастрычнік) і халоднага (лістапад-сакавік) перыядаў года, для ўсяго года для кожнай станцыі, пасля чаго былі падлічаны сярэднія па станцыях. Для другога этапа была адабрана большая колькасць станцый – трынаццаць: замест Баранавіч і Лынтупоў быў узяты назад Навагрудак, і былі дабаўлены Высокае, Ліда, Слуцк, Касцюковічы, Орша, Вілейка, Верхнядзвінск і станцыя Палесская. Матэрыялы былі ўзяты з электроннага архіву РГМЦ і ўяўлялі сабой сярэднія паказчыкі па месяцах. Яны ахоплівалі тэрмін з 1991 па 2011 гады – дастаткова рэпрэзентатывны перыяд. Па матэрыялах былі падлічаны сярэднія за год і ўвесь перыяд назіранняў асобна па станцыях і па ўсіх разам. Таксама былі вызначаны экстрэмальныя значэнні паказчыкаў.

Візуалізацыя вынікаў лічбавых разлікаў праводзілася па наступных паказчыках: атмасферны ціск на ўзроўні мора, хуткасць і накірунак ветру ля паверхні зямлі, тэмпература на ўзроўні 1000 гПа (мадэль WRF не дазваляе вынайсці тэмпературу менавіта на ўзроўні станцыі), вышыні геапатэнцыяльных паверхняў 850, 700, 500, 300 і 100 гПа, радыёлакацыйная адбівальнасць, суадносіны сумесяў вадкай воблачнай вільгаці, кропляў, ледзяных воблачных

крышталяў і снегу, акумуляваная колькасць ападкаў, а таксама температура, ціск, хуткасць і накірунак ветру і суадносіны сумесяў воблачных вадкай вільгаці, крышталікаў ільду, кропляў і снегу ў вертыкальнай плоскасці. Ажыццяўлялася візуалізацыя з дапамогай праграмага сродка NCL [89]. Выгляд, у якім інфармацыя будзе прадстаўлена – карты разліковых даменаў у канічнай праекцыі Ламберта (цыліндрычнай Меркатара для Бангі) і вертыкальныя профілі праз цэнтральныя часткі разліковага дамена, на якія будуць нанесены значэнні метэаралагічных паказчыкаў. Яны будуць прадстаўлены ў выглядзе каляровай шкалы (тэмпература, радыёлакацыйная адбівальнасць, суадносіны сумесяў, колькасць ападкаў) і ізаліній (ціск і ізатэрмы на профілях); вецер будзе прадстаўлены спецыяльнымі стрэлкамі і штырхамі.

2.1. СПАДАРОЖНІКАВЫЯ ДАСЛЕДВАННІ

КАНВЕКЦЫЙНЫХ ВОБЛАКАЎ І НАВАЛЬНІЦ

На сённяшні дзень гэта з'яўляецца адным з найбольш перспектыўных напрамкаў даследванняў разглядаемых з'яў: магчымасць вымярэння розных велічынь у розных дыяпазонах разам з вялікім ахопам тэрыторыі робяць ШСЗ выдатнымі метэаралагічнымі прыладамі. Але пры спадарожнікавых вымярэннях і даследваннях неабходна ўлічваць галоўны недахоп прыбораў, які накладвае свой выразны абітак – іх невялікі дазвол: ад 10-50 м у бачным дыяпазоне да 300-500 м у інфрачырвоным і каля 1 км у радыёдыяпазоне.

Вялікім плюсам спадарожнікавых вымярэнняў з'яўляецца тое, што з іх магчыма атрымаць інфармацыю пра імгненны стан надвор'я ў любы час (бесперапынны струмень інфармацыі забяспечваюць толькі геастацыянарныя ШСЗ – з палярна-арбітальных магчыма атрымліваць інфармацыю толькі падчас іх пралёта над разглядаемай тэрыторыяй, але гэтая праблема вырашаецца выкарыстаннем некалькіх спадарожнікаў) – на сённяшні дзень не ўсе метэаралагічныя станцыі могуць забяспечыць сапраўды бесперапынны струмень. Хаця нярэдка паказчыкі, якія вымяраюцца на ШСЗ і метэастанцыях, не супадаюць, але яны добра дапаўняюць адзін аднаго, і пры неабходнасці на падставе адных паказчыкаў шляхам разлікаў магчыма атрымаць значэнні іншых.

Таму спадарожнікая інфаармацыя шырока і паспяхова выкарыстоўваецца, у тым ліку для выяўлення тыпаў канвекцыйных воблакаў і навальніц – для гэтага патрэбна толькі ведаць значэнні ўскосных параметраў ідэнтыфікацыі, якія ўласцівы разглядаемым з'явам. Але гэта не адзіная магчымасць. Так, у артыкуле [56] прапанаваны спосаб дыягназа верагоднасці навальніц па спадарожнікавай інфармацыі – фактычна сродак вызначэння выбліскаў маланак па дадзеных ШСЗ. Для гэтага была прапанавана функцыянальная залежнасць, заснаваная на параметрах, якія можна атрымаць непасрэдна са спадарожнікавых вымярэнняў: радыяцыйнай тэмпературы, вышыні нулявой ізатэрмы, сярэдняй інтэнсіўнасці ападкаў, тэмпературы паветра і вертыкальнага размеркавання вільготнасці. Для даследвання была ўжыта інфармацыя са спадарожнікаў серыі Meteosat.

Разам з гэтым было праведзена параўнанне працаздольнасці прапанаванага спосаба дыягназа з дадзенымі сетак навальніцапеленгацый – найбольш маштабных сродкаў пошуку атмасферных электрычных разрадаў, якія выяўляюць маланкі па пэўных пакетах радыёімпульсаў. Былі выкарыстаны сеткі Вяйсяля, WWLLN (сетка Вашынгтонскага ўніверсітэта) і ALWES. Першая з іх, Вяйсяля – буйнейшая сетка ў свеце, мае найбольшую колькасць пунктаў рэгістрацыі, працуе ў дыяпазоне 1-350 кГц, што дазваляе рэгістраваць выбліскі маланак рознай магутнасці. Сетка WWLLN – уключае меншую колькасць станцый і працуе ў дыяпазонах 3-30 кГц – яна разлічана на рэгістрацыю толькі моцных выбліскаў, але ахоплівае ўсю планету. ALWES – рэгіянальная сетка, працуе на тэрыторыі Еўропы і Расіі. Усе яны здольны рэгістраваць даволі значную колькасць навальніц – ад 50% да 75%, але чым

далей ад пункта вымярэння адбылася навальніца, тым большая хібнасць у прасторавым вызначэнні: так, усе сеткі могуць паказаць навальніцу на тэрыторыі, дзе ў той момант не было ні адзінага воблака. Патрэбна адзначыць, што вымяральныя прылады сістэмаў не выдаюць імгненнай інфармацыі – яны абагульняюць, асерадняюць значэнні за некаторы непрацяглы (некалькі хвілін) прамежак часу, а ўжо потым перадаюць. Гэта ўскладняе параўнанне, але калі ўсёткі зрабіць яго, то можна ўбачыць даволі добрыя суадносіны паміж дадзенымі сетак навальніцапеленгацый і спадарожнікавых вымярэнняў – супадзенне па колькасці выпадкаў складае прыкладна 75-80%, а па паказчыку месцазнаходжання – каля 60%. Больш дакладна з дадзенымі ШСЗ суадносяцца дадзеныя з сеткі Вяйсця. Прычына меншага супадзення па месцазнаходжанні – хібнасці прыбораў пры вымярэннях на вялікіх адлегласцях (для сетак навальніца пеленгацыі) і пры вымярэннях ля ўскраін зоны бачнасці (для спадарожнікаў). Вынікі атрымаліся даволі добрыя, так што пры дапрацоўцы і далейшым развіцці гэты сродак можа стаць надзейным метэаралагічным інструментам.

2.2. ДАСЛЕДВАННІ КАНВЕКЦЫЙНЫХ ВОБЛАКАЎ

I НАВАЛЬНІЦ У БЕЛАРУСІ

Даследванні канвекцыйных воблакаў і з’яў, з імі звязаных – буйнейшыя накірунак метэаралагічных работ ва ўсім свеце, які на сённяшні дзень саступае толькі лічбаваму мадэляванню, але ў Беларусі ён не стаў распаўсюджаным. Звесткі пра навальніцы, атрыманыя тут, уяўляюць сабой статыстычную інфармацыю пра прасторава-часовае размеркаванне выпадкаў з’яў, а таксама пра трэнды іх змянення. Інфармацыя пра канвекцыйныя воблакі мае падобны характар, і яна менш багатая: у беларускай метэаралагічнай практыцы воблакі вертыкальнага развіцця адносяць у адну групу з воблакамі ніжняга яруса і разглядаюць разам, таму вылучэнне патрэбнай інфармацыі праблематычна.

Асноўныя звесткі пра праявы навальніц на тэрыторыі Беларусі знаходзяцца ў ацэнках работ, такіх як «Опасные гидрометеорологические явления на территории Беларуси» У. Ф. Логінава, А. А. Волчак і І. Н. Шпока. Галоўныя паказчыкі размеркавання таксама прыводзяцца ў даведніку па клімату (дакладней, у шостай яго частцы “Воблачнасць. Атмасферныя з’явы”), які з’яўляецца ключавым складніковым дзяржаўнага кліматычнага кадастра Рэспублікі Беларусь. У гэтай жа частцы даведніка мясцуюцца галоўныя статыстычныя паказчыкі размеркавання воблачнасці, агульныя і па тыпах. Інфармацыя пра паўтаральнасць (асярэдняная па месяцах) розных тыпаў аблокаў маецца ў электронным архіве РГМЦ. Але больш звестак пра разглядаемыя з’явы на тэрыторыі Беларусі амаль што няма.

Прычыны гэтага складаюцца ў наступным. У першую чаргу, комплексныя даследванні канвекцыйных воблакаў і навальніц дорагі – радараў і радыёзондаў для гэтага не дастаткова, неабходны самалёты-метэалабараторыі і шэраг іншых сродкаў, а таксама адпаведныя сродкі апрацоўкі інфармацыі. З-за гэтага падобныя працы праводзіліся далёка не ўсюды: так, у савецкія часы яны ажыццяўляліся пераважна ў наваколлях Масквы і Ленінграда, а таксама на Каўказе – рэгіёне з найбольш частымі на тэрыторыі былога СССР навальніцамі. У іншых рэгіёнах – у тым ліку і Беларусі – падобныя даследванні праводзіліся рэдка, таму інфармацыі для іх вельмі мала ці няма ўвогуле. Потым з-за развалу СССР і скарачэння фінансавання навуковых даследаванняў ва ўсіх былых саюзных рэспубліках, якое рушыла следам, вывучэнні спыніліся.

Таму беларускія навукоўцы карыстаюцца статыстычнымі дадзенымі, атрыманымі на тэрыторыі краіны, а матэрыялы комплексных даследаванняў вымушаны браць з архіваў іншых краін.

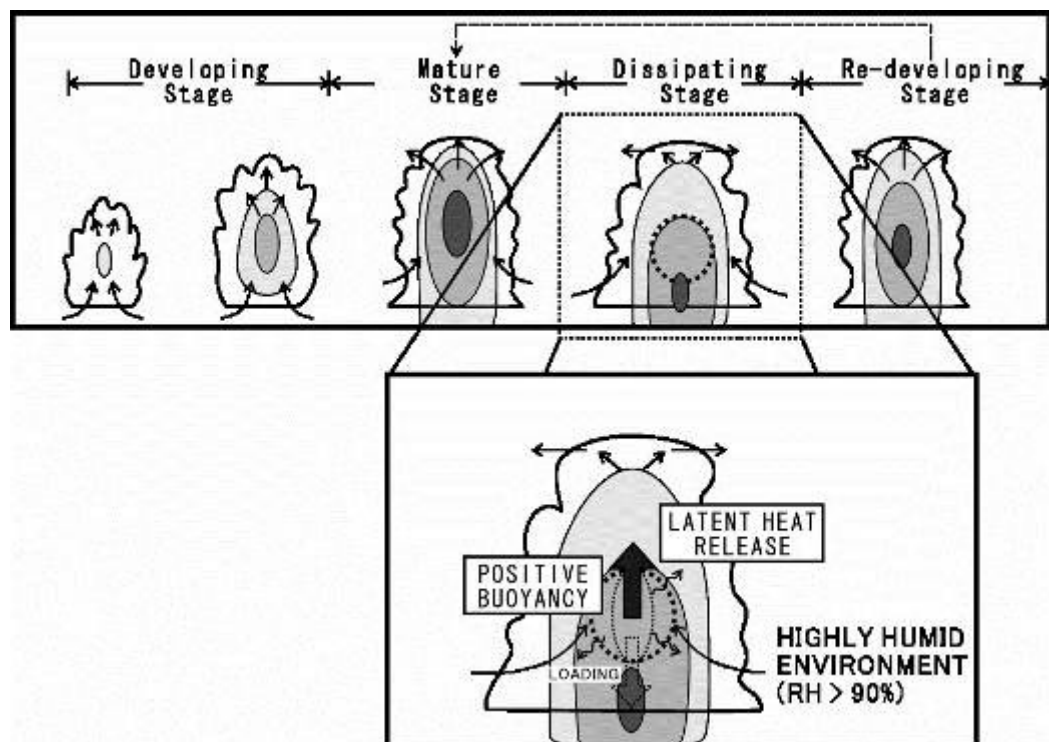
РАЗДЗЕЛ 3. КАНВЕКЦЫЙНЫЯ ВОБЛАКІ І НАВАЛЬНІЦЫ

ЯК ФІЗИЧНЫЯ З'ЯВЫ АТМАСФЕРЫ

3.1. ФАРМИРАВАННЕ КАНВЕКЦЫЙНЫХ ВОБЛАКАЎ І ІХ РАЗВІЦЦЁ

З усіх відаў воблакаў, што існуюць, да канвекцыйных адносяцца менш чвэрці: воблакі сямейства вертыкальнага развіцця – кучавыя (добрага надвор'я, сярэднія і моцныя) і кучава-дажджавыя (лысыя, валасатыя і воблакі з кавадламі; зрэдку сустракаюцца так званыя вымяпадобныя), а таксама ўсе тыя віды, ўтварэнне якіх злучана з воблакамі вертыкальнага развіцця (слаіста-кучавыя, высокакучавыя кучавападобныя і шэраг пёрыстых). Але звычайна пры разгледжванні канвекцыйных воблакаў вывучаюць менавіта тыя воблакі, што з'яўляюцца непасрэдным наступствам канвекцыі – сямейства вертыкальнага развіцця. У дадзенай рабоце не станем адступаць ад гэтай традыцыі.

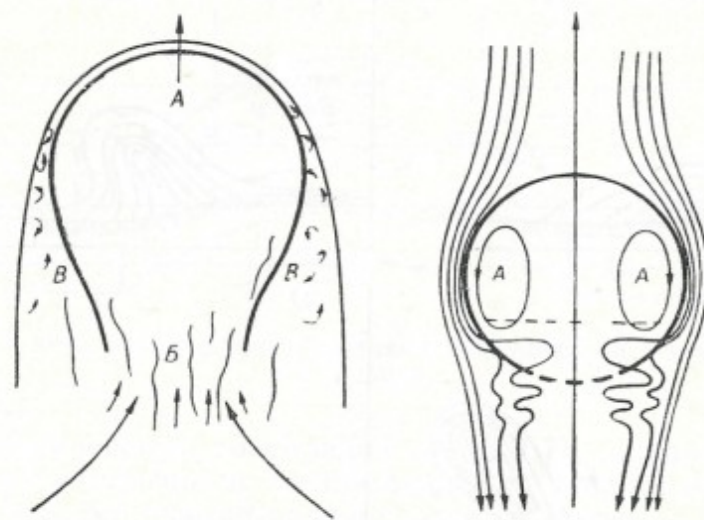
Воблакі вертыкальнага развіцця выдзелены ў асобны клас з-за наступных прычынаў: першая – іх генэзіс адрозны ад іншых тыпаў, другая – яны не размяркоўваюцца па ярусах, трэцяя – па сваіх памерах і колькасці ўнутранай энергіі яны могуць і нярэдка пераўзыходзяць усе астатнія віды, чацвёртая – адносная непрацягласць жыцця, максімум 3-5 гадзін. Але найбольш адметнай іх рысай з'яўляецца тое, што ўсе віды, фактычна, з'яўляюцца толькі стадыямі аднаго працэса (павелічэнне ад кучавага добрага надвор'я да моцнага, потым пераход у кучава-дажджавое і рост кавадлы). Ён будзе падрабязна разгледжаны далей, а пакуль што адлюструем яго з дапамогай наступнай схемы:



Мал. 3.1.1. Схема развіцця канвектыўных аблакаў [94]

Але перад тым, як прыступіць да разгледжвання саміх воблакаў, неабходна даць характарыстыку працэса, дзякуючы якому яны ўзнікаюць. Згодна тэрміналогіі, канвекцыя ў агульным сэнсе – перанос часціцы вадкасці ці газу ў пэўным напрамку. Паколькі перанос у гарызантальных накірунках прынята называць адвекцыяй, то звычайна пад канвекцыяй маецца на ўвазе рух у вертыкальным накірунку. Ён можа быць як лінейным, так і нелінейным, мае разнавіднасці, і залежыць ад цэлага шэрагу параметраў: тэмпературы паветра на розных узроўнях і на паверхні, турбулентнасці, прыхода і сыхода радыяцыі (што, у сваю чаргу, з’яўляецца “прычынай” тэмпературы), альбеда, характара падсілаючай павярхні, рэльефа і яго ўплыву на астатнія фактары.

Калі разглядаць сам перанос паветра па вертыкалі (так званыя тэрмікі), то яно бывае двух відаў: у выглядзе “бурбалак” і ў выглядзе бруй. Згодна лабараторных эксперыментаў і назіранням ў натуральным асяроддзі, тэрмікі ў выглядзе “бурбалак” утвараюцца ў тых выпадках, калі паверхня мае больш роўны рэльеф, але мае рэзкія адрозненні ў радыяцыйных уласцівасцях (напрыклад, паверхня стракатая, і таму вельмі адрознае альбеда). Таксама такія тэрмікі назіраюцца пры моцнай турбулентнасці і ў выпадках, калі, незалежна ад рэльефа і альбеда, паверхня недастаткова прагрэта. Абагульненая схема “бурбалкі” выглядае наступным чынам:



а — схема пузыря, А — нагретая масса воздуха, В — кильватерная зона, В — зона эрозии; б — линии тока в поднимающемся пузыре (по Левину), А — кольцевой вихрь.

Мал. 3.1.2. Будова канвекцыйнай “бурбалкі” [51]

Канвекцыйныя бруі развіваюцца ў выпадках, калі ўзыходным рухам паветра спрыяе рэльеф, паверхня не стракатая, аднародная (і чым меней альбеда, тым гэта выразней праяўляецца) і турбулентнасць менш інтэнсіўна – пры гэтым ў выпадках складанага горнага рэльефа турбулентныя плыні могуць быць вельмі моцнымі, але канвекцыйныя струмені усё роўна будуць мець выгляд бруй.

Таксама бруі ўтвараюцца пры больш моцным нагрэве амаль што незалежна ад характара паверхні.

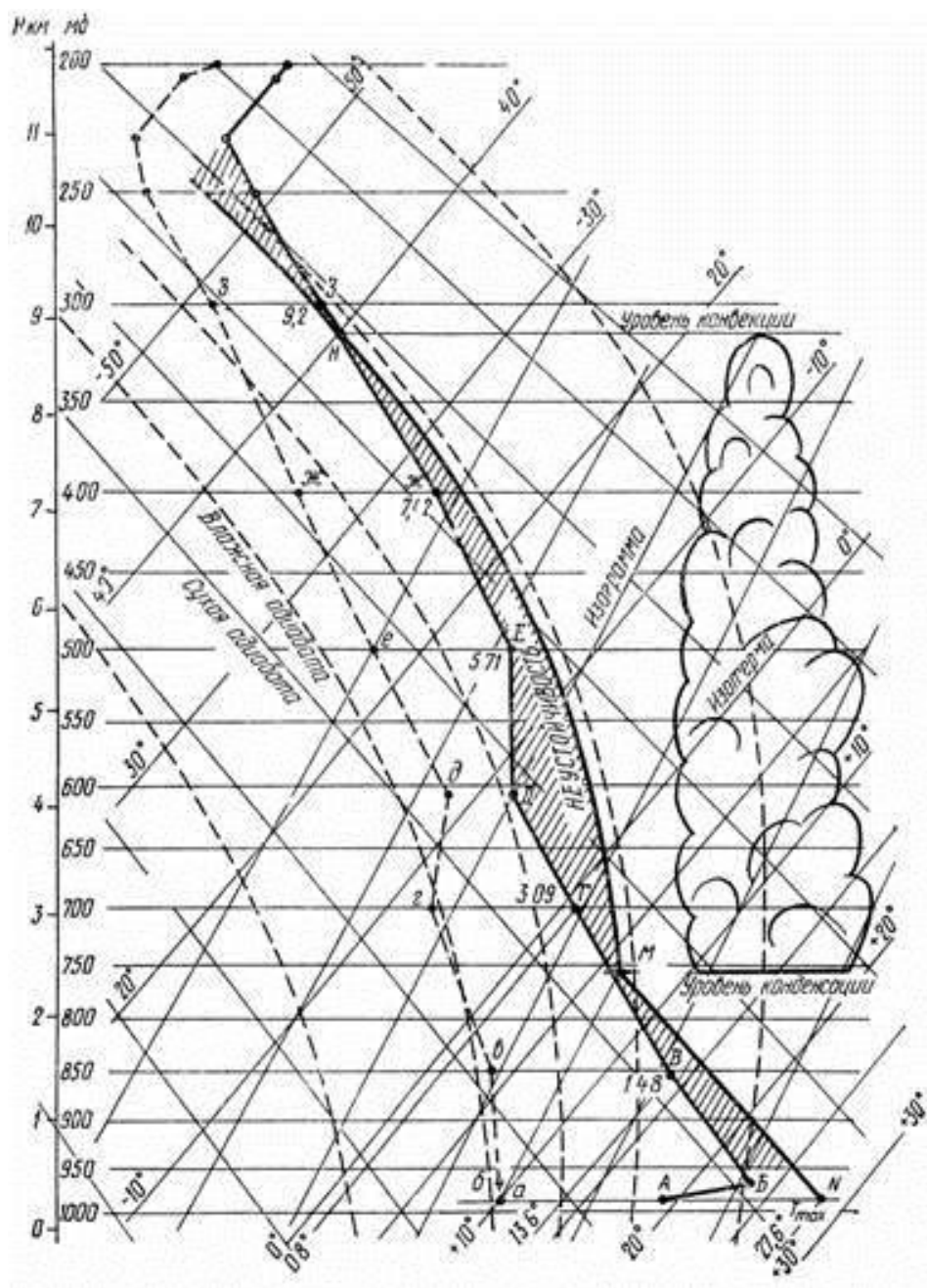
Для апісання рухаў паветра пры канвекцыі выкарыстоўваецца спецыяльная сістэма раўнанняў. Па змаўчанні лічыцца, што разгледжваецца цеплавая канвекцыя. У самым агульным выглядзе дадзеная сістэма можа быць запісана ў наступным выглядзе (таксама вядомым як раўнанні, ці набліжэнне, Буссінэска):

$$\begin{aligned}\rho_0\left(\frac{\partial v}{\partial t}+(v\nabla)v\right) &= -\nabla p + \eta\nabla v + \rho(T)g \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v\nabla T &= \chi\nabla T \\ \operatorname{div} v &= 0\end{aligned}$$

дзе ρ_0 – пачатковая шчыльнасць, T – адхіленні тэмпературы, η – дынамічная глейкасць, χ – каэфіцыент тэмператураправоднасці, p – ціск, g – паскарэнне свабоднага падзення, v – хуткасць. Зразумела, у залежнасці ад мэтай даследванняў яны могуць быць зменены, а спрашчэнні і набліжэнні адменены. Гэтыя раўнанні ўжывальны для ідэальнага газавага асяроддзя, таму для таго, каб зрабіць іх выкарыстанне магчымым для разлікаў у рэальнай атмасферы, неабходна ўводзіць удакладненні – на ўлік уздзеяння вільгаці, іншых дамешкаў, турбулентнасці і такой з’явы, як уцягванне паветра ў “бурбалку” ці брую.

Вынікам канвекцыі з’яўляецца развіццё воблакаў. Іх разгледжванне патрэбна пачынаць з працэса ўтварэння. Як вядома, у трапасферным паветры ўтрымліваецца вадзяная пара і вільгаць у іншых формах. Воблакі – гэта і ёсць часцінкі вільгаці, якія рознымі шляхамі (каагуляцыяй, працягваннем кандэнсацыі ці сублімацыі і інш.) павялічыліся да такіх памераў, каб стаць бачнымі, пачалі расейваць святло. Узнікаюць яны тады, калі дасягаецца дастатковая канцэнтрацыя (яна вельмі зменлівая і залежыць ад многіх знешніх фактараў) – гэта тычыцца месцазнаходжання і ў гарызантальнай, і ў вертыкальнай плоскасці. Гаворачы пра вышыні ўзнікнення воблакаў, то яны могуць развівацца толькі над узроўнем кандэнсацыі, вышыннай адметкі, на якой і дасягаюцца зручныя для ўтварэння кропель умовы – сухааддыбатычны пад’ём змяняецца вільготнааддыбатычным, дасягаецца стан насычэння. Нярэдка ў яго якасці прымаецца ніжняя мяжа кучавых воблакаў, але на самой справе гэта далёка не так – там толькі пачынаецца ўтварэнне буйных часцінак, а колькасць, пры якой сукупнасці часцінак становяцца бачнымі, дасягаюцца на некалькі дзясяткаў, а тое і соцень метраў вышэй. Верхняй мяжой воблакаў вертыкальнага развіцця з’яўляецца так званы ўзровень канвекцыі. Ім можа стаць інверсіі ці гоматэрміі, якія перашкаджаюць аддыбатычным падняццям, а таксама вобласць з магутным плоскасцевым цячэннем паветра. Але калі канвекцыйныя струмені маюць значнае і, галоўнае, працяглае падсілкоўванне, то ён можа быць пераадолены. Да гэтага здольны толькі кучава-дажджавыя (і кучавыя моцныя ў тропіках) воблакі – у іх дастаткова энергіі, каб прабіць перашкоды ніжэйшых узроўняў і дасягнуць трапапаўзы, “галоўнага ўзроўня канвекцыі”, які яны пераадолець ўжо не ў сілах (хаця рэдкія выключэнні ў экватарыяльных і рапічных шыротах усёткі назіраюцца). Развіццё з цягам часу і магутнасць воблакаў даволі зручна адлюстроўваць з дапамогай аэралагічных

дьяграмаў, бо на іх наносяцца (і па ім вызначаюцца) найбольш поўныя характарыстыкі.



Мал. 3.1.3. Аэралагічная дьяграма (АБВГДЕЖЗ – крывая стратыфікацыі, абвгдежз – крывая кропак расы, NMH – крывая стану) [79]

Зараз будзе прыведзена апісанне стадый развіцця канвекцыйных воблакаў.

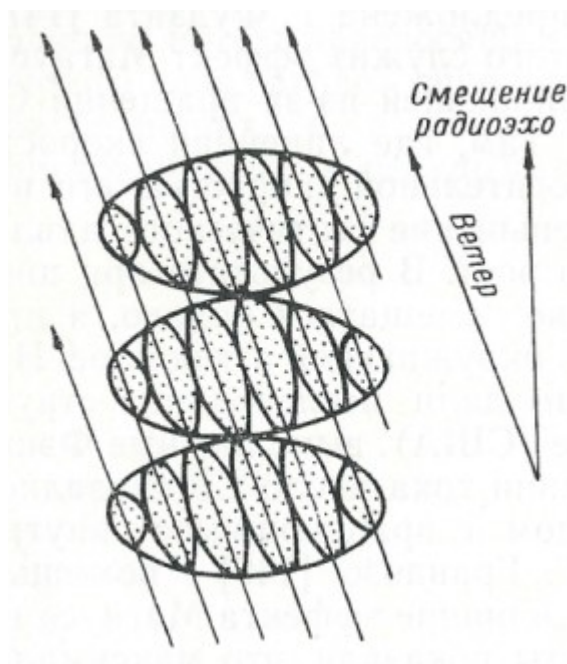
- Кучавыя воблакі добрага надвор'я (*Cumulus humilis*). Першая стадыя развіцця канвекцыйнага воблака. Вылучаюцца невялікімі памерамі (не болей 1-1,2 км у дыяметры і 0,5-0,6 км па вышыні) і тым, што заўсёды звязаны з адной канвекцыйнай вочкай. Крышталічнымі амаль ніколі не бываюць – складаюцца толькі з часцінак вадкай фазы. Выключэнні магчымы для воблакаў, што з'яўляюцца ў зімовы перыяд.

- Кучавыя сярэднія (*Cumulus mediocris*). Пераходная форма паміж воблакамі добрага надвор'я і моцнымі. Адрозніваюцца большымі памерамі (да 2-2,5 км у дыяметры і да 1-1,5 км у вышыню) і тым, што пачынаючы менавіта з гэтай стадыі воблака можа складацца не з адной, а з некалькіх вочкаў.
- Кучавыя моцныя (*Cumulus congestus*). Гэта воблакі, якія набліжаюцца ці ўжо дасягнулі ўзроўня канвекцыі. Могуць дасягаць да 3,5-5 км у дыяметры і да 2-3 км у вышыню (у трапічных шыротах – ў паўтара разы болей). Пераходная стадыя да кучава-дажджавых воблакаў – у іх ужо могуць выпадаць ападкі і пачынацца электрычныя працэсы. Адметны факт, што шмат воблакаў на гэтай стадыі дысіпуюць.
- Кучава-дажджавыя лысыя (*Cumulonimbus calvus*). Да гэтай групы адносяцца ўсе воблакі, у якіх пачынае з'яўляцца ледзяная фаза; некаторыя з іх могуць пераадольваць узроўні канвекцыі. У іх ужо інтэнсіўна ідуць электрычныя працэсы, выпадаюць ападкі. Памеры іх дасягаюць да 10 км у дыяметры і да 6-8 км у вышыню. Хаця іх тыповы выгляд – гіганцкі купал, яны нярэдка шматвочкавыя (прыкмета гэтага – невялікія “груды”).
- Кучава-дажджавыя валасатыя (*Cumulonimbus capillatus*). Падчас гэтай стадыі воблака дасягае моцнага узроўня канвекцыі – часта ім з'яўляецца трапапаўза – і іх вяршыні пачынаюць “расцякацца”. У астатнім жа яны падобны да лысых кучава-дажджавых (адзінае выключэнне – яны становяцца яшчэ болей: да 12 км у дыяметры і 7-9 км у вышыню). Пачынаючы з гэтай стадыі могуць фарміравацца так званыя “супервочкі” – вынік аб'яднання усіх канвекцыйных вочак воблака.
- Кучава-дажджавыя з кавадлай (*Cumulonimbus incus*). Стадыя, якая дасягаецца тады, калі воблака “ўпёрлася” ва ўзровень канвекцыі (ці трапапаўзу), і калі яго вяршыня ўжо даволі значна “расцяклася”, утварыўшы пёрыстыя воблакі. Падчас яе дасягаецца найбольшая магутнасць – і электрычная, і па інтэнсіўнасці ападкаў – і найбольшыя памеры (дыяметр да 13-15 км (у тропіках да 20-22 км), а вышыня да 8-11 км (у тропіках – да 15-18 км)). Пасля можа быць толькі дысіпацыя.

Воблакі вертыкальнага развіцця назіраюцца пераважна над кантынентамі, і доўгі час лічылася, што яны ўвогуле не могуць узнікаць над воднай паверхняй, бо, хаця акіян і паглынае радыяцыі болей, чым суша, але з-за рухомасці яго паверхні “крыніцы цяпла” нестацыянарны. Але вынікі даследванняў, праведзеных у сярэдзіне мінулага стагоддзя паказалі, што гэта далёка не так: пры наяўнасці моцных накіраваных уверх плыняў, якія існуюць працяглая прамежкі часу ці пастаянна, канвекцыйныя воблакі могуць узнікаць як над вадкай, так і над цвёрдай паверхняй – галоўнае, што маецца цеплавая энергія і вільгаць. Найбольш яркі прыклад – воблачнасць унутрытрапічнай зоны канвергенцыі, але падобнае адбываецца і ва ўмераных шыротах пры наяўнасці франтоў.

Таксама неабходна адзначыць, што развіцця шматвочкавыя воблакі могуць існаваць куды больш працяглы перыяд часу, чым самі вочкі: старыя “складнікавыя” будуць разбурацца на адным баку, а новыя – з'яўляцца на

іншым, і не абавязкова процілеглым. Дарэчы, менавіта гэтым тлумачыцца ўласцівасць кучава-дажджавых воблакаў рухацца пад значнымі вугламі да вядучага струменя. Сама з'ява можа быць адлюстравана наступным чынам:



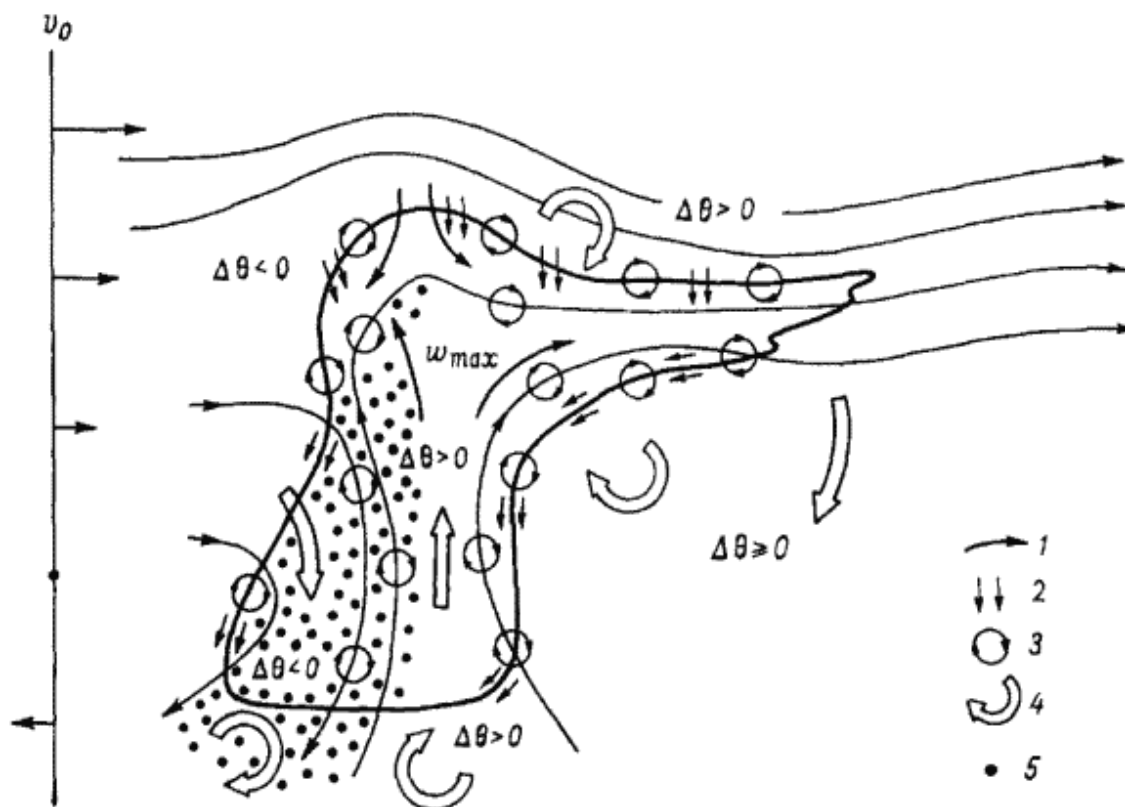
Мал. 3.1.4. Схема перамяшчэння шматвочкавага канвектыўнага воблака пад вуглом да вядучага струменя (вочкі вызначаны па радыёрэху) [79]

Яшчэ адной цікавай уласцівасцю канвекцыйных воблакаў з'яўляецца наяўнасць сутачнага хода. Так, найбольшая воблачнасць назіраецца ў перыяд з 15 да 19 гадзін. Вядома, што інтэнсіўнасць канвекцыі вызначаецца ступенню прагрэву паверхні зямлі (у першую чаргу) і паветра над ім. Максімальныя значэнні тэмператур прыходзяцца на тэрмін 13-16 гадзін. Паколькі на развіццё канвекцыйнага воблака патрэбен яшчэ некаторы час, то становіцца зразумелым, чаму найбольшая воблачнасць назіраецца ў вячэрнія часы. Гэта заканамернасць выразна праяўляецца ва ўмераных шыроты, ў экватарыяльных рэгіёнах яна менш заўважна з-за адрознага характара змянення тэмператур.

Пытанне перахода кучавых воблакаў у кучава-дажджавыя з'яўляецца вельмі важным, таму патрабуе больш падрабязнага разгледжвання. Пачаць яго патрэбна з характарыстыкі таго, што вылучае *Cumulonimbus* сярод іншых канвекцыйных воблакаў – ледзяной фазы. Менавіта з-за часцінак ільду адбываецца больш інтэнсіўнае выпадзенне ападкаў (яны адыгрываюць ролю дадатковых ядзер кандэнсацыі) і электрызацыя воблакаў (хаця іх колькасць і маса ў воблаке можа быць у разы меншай за колькасць вадкіх часцінак, але на іх засяроджана каля 85-90% зараду). Вобласць распаўсюджвання ледзяной фазы ляжыць вышэй ізатэрмы 0°C, узроўня замярзання, і пачынаецца яна – прынамсі, у першыя часы пасля з'яўлення крышталікаў – далёка ад яе. Гэта адбываецца таму, што часцінкам вільгаці для таго, каб замерзнуць (дарэчы, як і каб скандэнсавацца), недастаткова дасягнення спрыяльных умоў – неабходна

наяўнасць паверхні, ядра. Інакш фазавага пераходу назірацца не будзе: часцінкі могуць заставацца вадкімі і пры тэмпературах ніжэйшых за -20°C . Але пры дасягненні тэмператур, блізкіх да -30°C - -40°C (назіраюцца ля верхняй мяжы воблакаў, прыкладна на 3-4 кіламетры вышэй за ўзровень нулявой ізатэрмы) пераахалоджаная вільгаць пачынае замярзаць і без уздзеяння ядзер. Калі колькасць заледзянелых часцінак становіцца значнай, то пачынаецца лавінападобнае замярзанне, якое хутка распаўсюджваецца на ніжэйшыя ўзроўні – крышталікі самі становяцца ядрамі. Усё гэта адбываецца яшчэ ў *Cb. Calvus*.

Але кучава-дажджавыя воблакі вылучаюцца не толькі наяўнасцю ледзяной фазы – іх магчыма ідэнтыфікаваць і па шэрагу іншых параметраў. Да іх адносяцца праявы электрычных працэсаў (параметры радыёрэха, напрыклад, калі з'яўляюцца пакеты імпульсаў радыёвыпраменьванняў працягласцю болей за 20 мс, гэта значыць, што ў воблаку пачалося ўтварэнне маланак [55]), энергія неўстойлівасці, характар размеркавання паветраных плыняў і магутнасці вятроў (так, у *Cumulonimbus* назіраюцца моцныя і ўзыходныя, і сыходныя рухі).



1 — направление токов, 2 — нисходящие токи, вызванные испарением облачных элементов, 3 — участки интенсивного турбулентного обмена, 4 — участки интенсивной болтанки самолетов вне облака, 5 — частицы осадков. Слева показан вертикальный профиль относительной скорости ветра u_0 ; $w_{\max}$ — область максимальных скоростей восходящих токов.

Мал. 3.1.5. Кучава-дажджавое воблака ў стадыі сталасці (мадэль С. М. Шметэра), схема размеркавання паветраных плыняў [79]

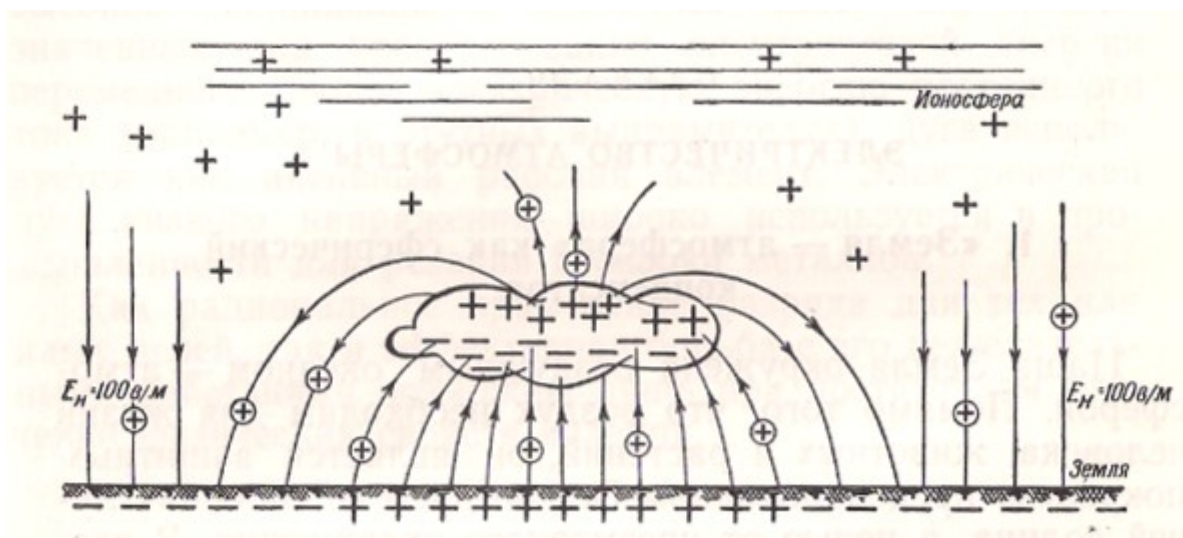
Сам пераход *Cumulus* у *Cumulonimbus* цалкам і поўнасьцю залежыць ад магутнасці канвекцыйнага струменя – ён вызначае і працягласць перыяду існавання, і хуткасць развіцця, і памер воблака, і яго ўнутраную энергію. А магутнасць струменя, у сваю чаргу, вызначаецца ступенню нагрэва падсілаючай паверхні (якая залежыць ад шыраты мясцовасці, характару покрыва, стракатасці, альбеда і шэрагу іншых фактараў) і характарам рэльефу. Патрэбна адзначыць, што хуткасць развіцця працэсаў амаль што цалкам залежыць ад ступені нагрэву – рэльеф на яе ўплывае нязначна. Роля араграфіі мясцовасці праяўляецца ў верагоднасці пачатку развіцця канвекцыі – чым больш няроўны рэльеф, тым вышэй верагоднасць утварэння канвекцыйнага струменя – а таксама на працягласці існавання воблака і струменя (наступства прымусовай кампаненты пад’ёму) – хаця названыя паказчыкі залежаць не толькі ад яе. На магутнасць струменяў і воблакаў выразна ўплываюць абодва фактара.

3.2. ЭЛЕКТРЫЧНАЕ ПОЛЕ АТМАСФЕРЫ

Наяўнасць электрычнага поля – уласцівасць усіх макраскапічных фізічных целаў. Атмасфера выключэннем не з’яўляецца – электрычныя зарады сустракаюцца на ўсім яе працягу, але большасць засяроджана ў іянасферы (якая сама, у сваю чаргу, падзяляецца на тры слаі: D, E і F).

Фізічныя характарыстыкі поля наступныя: зарад – пераважна дадатны, мае велічыню каля $3 \cdot 10^5$ Кл, што роўна зараду зямной паверхні, але адваротнаму па знаку, напруга (калі ўявіць зямную паверхню і іянасферу ў якасці абкладакаў гіганцкага шаравога кандэнсатара) – каля 200000 В, напружанасць – у сярэднім 130 В/м (змяняецца па экспаненцыяльнаму закону, і вышэй 10 км фактычна нязменна і блізкая да нуля), сумарная велічыня тока, які паступае ад дадатна зараджанай іянасферы да зямной паверхні, складае каля 1800 А. Гэта вялікія велічыні, але, калі ўлічыць памеры атмасферы, то ўдзельныя значэнні атрымаюцца нязначнымі – напрыклад, шчыльнасць тока праводнасці складае у сярэднім усяго каля $(2-3) \cdot 10^{-12}$ А/м². У сукупнасці з нязначным значэннем электраправоднасці – $9 \cdot 10^{-14}$ 1/Ом·м – гэта прыводзіць да таго, што наяўнасць поля магчыма адзначаць толькі з дапамогай прыладаў – адчувальнай атмасфернай электрычнасць становіцца толькі ў асобных выпадках падчас навальніц.

Хаця іянасфера мае агульны дадатны зарад, а паверхня зямлі – адмоўны, ток у павераным асяроддзі не цячэ ў адным накірунку. Звычайна мае месца быць перасоўванне дадатных зарадаў у бок паверхні. Поле з такім накірункам называецца даданым і назіраецца ў дні з ясным надвор’ем (ад чаго пайшла яго другая назва – поле яснага надвор’я). Адваротны накірунак руху назіраецца падчас навальніц – кучава-дажджавыя воблакі здольны ствараць уласныя, моцныя па ўдзельных значэннях электрычныя палі, якія выклікаюць пераразмеркаванне зарадаў у верхніх слаях атмасферы і на паверхні зямлі. Гэта магчыма адлюстравать з дапамогай наступнай схемы:



Мал. 3.2.1. Схема электрычнага стану атмасферы і паверхні зямлі [58]

Наяўнасць двух процілеглых накірункаў цячэння тока неабходна для таго, каб падтрымліваць баланс зарадаў іянаферы і зямной паверхні. Ролю галоўнага рэгулятара іграюць навальніцы – ва ўсепланетарным маштабе нязначныя працэсы, але штосекундна на Зямлі іх адбываюцца сотні. Менавіта высокая частота навальніц і робіць падтрымліванне балансу магчымым.

Дарэчы, пераразмеркаванне зарадаў адбываецца не толькі ў навальнічных воблаках – яно ўласціва ўсім воблакам. Але, так як ў ярусных яно ідзе адрозным шляхам, то ў выніку іх электрычнае поле супадае па накірунку з агульным электрычным полем атмасферы, і нярэдка воблака мае адзін пераважны зарад.

Асобна патрэбна разгледзець пытанне носьбітаў зараду ў атмасферы. З-за ўласцівасцяў самага асяроддзя найбольш распаўсюджанага віда носьбітаў у прыродзе – свабодных электронаў – там амаль што няма. Такім чынам пераносчыкамі зараду становяцца аэразольныя часцінкі (вадкія і цвёрдыя, але гэта ўласціва воблакам) і, у першую чаргу, іёны.

Хаця менавіта іёны з’яўляюцца галоўнымі носьбітамі, але пры параўнанні з сярэдняй колькасцю малекул ў адным кубічным сантыметры паветра (каля $2,7 \cdot 10^{19}$ штук), іх колькасць будзе проста мізэрнай – усяго 1100 штук у сярэднім (дадатных – 600, адмоўных – 500). Гэта растлумачвае, чаму электрычнае поле агульнай атмасферы неадчувальна для чалавека, і чаму пераважае дадатны зарад.

Акрамя класіфікацыі па зараду вельмі важнай з’яўляецца класіфікацыя іёнаў па рухомасці, якая вызначаецца масай і велічынёй зараду. Згодна ёй выдзяляюць:

- лёгкія іёны (з рухомасцю 1 м/с і болей – звычайна да 2 м/с);
- цяжкія іёны (з рухомасцю да 0,008 м/с);
- сярэднія іёны (з рухомасцю ў межах ад 0,008-0,01 м/с да 1 м/с). [51]

Іёны таксама класіфікуюцца і па радыўсу. Але галоўнае адрозненне паміж групамі складаецца ў тым, што для лёгкага іёна наяўнасць зараду – самая важная характарыстыка, а для цяжкага – не. З-за наяўнасці зараду іёны прыцягваюць да сабе іншыя малекулы (уплываючы ў тым ліку і на нейтральныя) і з-за гэтага утвараюць нешта накшталт кангламератаў. Калі лёгкі іён пазбавіцца зараду, ён больш не зможа прыцягваць да сабе іншыя малекулы, кангламерат распаўсцяцца. Вакол жа цяжкага іёна пры згубе ім зараду кангламерат малекул будзе існаваць даволі працяглы па маштабам атамарных часцінак час. Сярэднія іёны па сваіх уласцівасцях больш блізкія да цяжкіх, чым да лёгкіх. Зарад поля яснага надвор’я фармуюць пераважна маларухомыя іёны.

Калі гаварыць аб прычынах з’яўлення электрычных зарадаў у атмасферы, то, абагульняючы высновы розных даследчыкаў і вучоных, магчыма вызначыць наступныя шляхі:

- касмічнае выпраменьванне. Зарад іянаферы – месца найбольшага засяроджвання электрычнай энергіі ва ўсёй паветранай абалонцы нашай планеты – амаль цалкам фарміруецца ім. Пад уздзеяннем электрамагнітных хваляў і

карпускулаў, што прыходзяць з касмічнай прасторы, малекулы паветра ў верхніх слаях атмасферы разбіваюцца і пераўтвараюцца, змяняюцца іх электронныя абалонкі. Выдзяляецца два віда касмічнага выпраменьвання: сонечнае – найбольш моцнае, інтэнсіўнае і, такім чынам, уплывовае, і якое бывае і хвалевым, і карпускулярным, і міжзорнае, менш уплывовае, якое прадстаўлена пераважна часцінкамі і, зрэдку, высокачашчыннымі хвалямі;

- іянізацыя малекул і атамаў пры сутыкненнях. Значнасць гэтага фактара змяняецца ў залежнасці ад шчыльнасці асяроддзя – чым большая шчыльнасць паветра, тым вышэйшая верагоднасць таго, што адбудзецца сутыкненне. Таксама інтэнсіўнасць працэса залежыць ад хуткасці часцінак паветра, якая вызначаецца колькасцю цяпла;

- уплыў сілы трэння. Галоўная прычына фарміравання зарадаў на часцінках аэразоля, кроплях вільгаці і ледзяных крышталях. Лічыцца, што менавіта гэты фактар з’яўляецца галоўнай прычынай фарміравання зарадаў у навальнічных і іншых воблаках;

- штучныя прычыны. Да іх магчыма аднесці эмісію аэразоляў (тэхнагенныя аэразолі часам маюць зарад ужо ў момант траплення ў атмасферу), штучную радыёактыўнасць (выпрабаванні ядзернай зброі на паверхні зямлі, акіянах, атмасферы і ў калязямной прасторы) і накіраванае ўздзеянне на аб’екты, падчас якіх ужываюцца іянізаваныя часцінкі.

Зарады на паверхні зямлі ўзнікаюць пад уплывам знешняга выпраменьвання (сонечнага, касмічнага і выпраменьвання самой атмасферы), прыроднай і штучнай радыёактыўнасці.

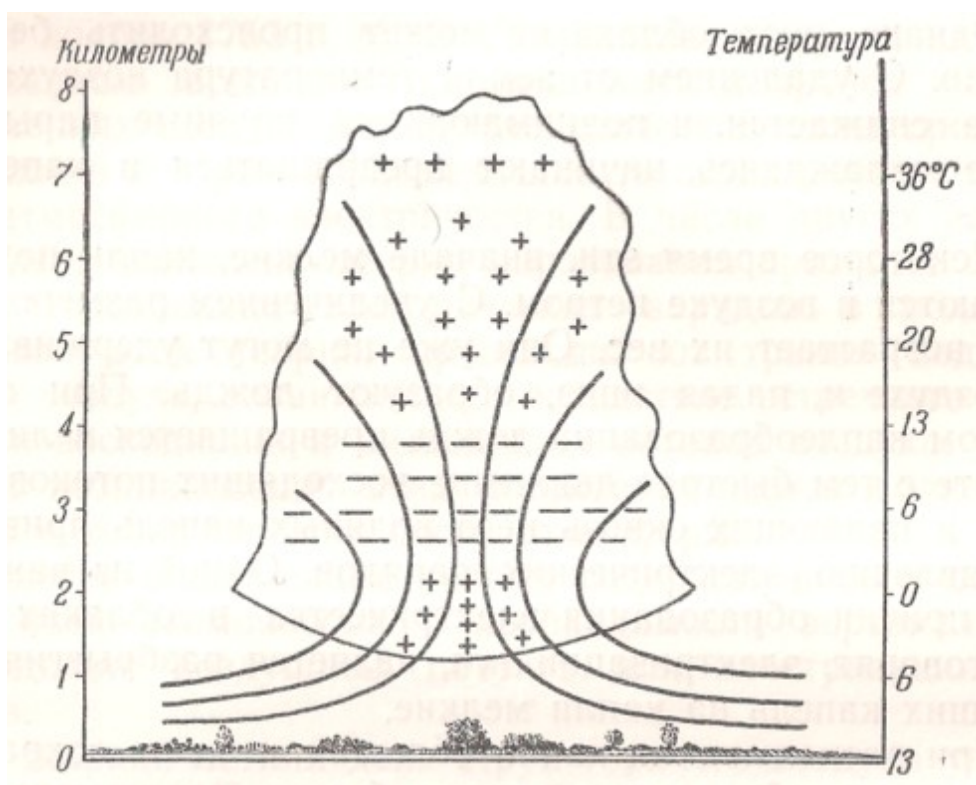
Перад сканчэннем патрэбна адзначыць, што наяўнасць электрычнага поля заўсёды ўплывае на ход метэаралагічных працэсаў, але нязначнасць поля агульнай атмасферы ў лакальных маштабах робіць гэтае ўздзеянне нязначным.

3.3. ПРАЦЭСЫ ЭЛЕКТРЫЗАЦЫІ КАНВЕКЦЫЙНЫХ ВОБЛАКАЎ І НАВАЛЬНІЧНЫЯ З’ЯВЫ

Воблакі таксама належаць да групы макраскапічных целаў, таму электрычнае поле маецца і ў іх. Адрозненні паміж палямі розных відаў воблакаў складаюцца ў велічынях зарада і яго размеркаванні.

Так, ненавальнічныя воблакі ў большасці выпадкаў маюць электрычнае поле, якое супадае з агульным электрычным полем атмасферы па накірунку цячэння токаў і размеркаванню зарадаў, і крыху пераўзыходзіць яго па ўдзельнай велічыні. Выключэнні могуць назірацца пры няўнасці моцных плыняў унутры – гэтым, напрыклад, растлумачваюць існаванне воблакаў, у якіх выразна пануе зарад аднаго знаку.

У кучава-дажджавых воблаках электрычныя палі праяўляюцца найбольш ярка. Хаця іх памеры на парадкі меншыя за поле агульнай атмасферы, але яны валодаюць куды большым удзельным зарадам: 10^{-11} Кл/м³ на 1 см³ у сярэднім супраць $1,6 \cdot 10^{-14}$ Кл/м³ на 1 см³ для агульнаатмасфернага поля. Шчыльнасць тока праводнасці унутры іх можа быць настолькі высокай, што будзе адчувацца без усялякіх прыбораў. Сярэдняя велічыня сумарнага зараду складае 1000 ± 250 Кл. Напружанасць поля ў самых моцных навальнічных аблоках можа дасягаць да 10000 В/м, але звычайна яна складае 100-1000 В/м (пры праходжанні маланкі яна павялічваецца да 200-300 тыс. В/м). У воблаках маюцца цэнтры засяроджвання і дадатных, і адмоўных зарадаў, якія размяркоўваюцца так:

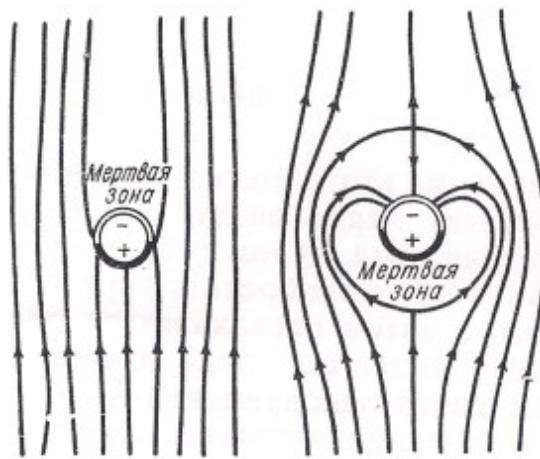


Мал. 3.3.1. Звычайнае размеркаванне электрычных зарадаў у навальнічным воблаке [58]

Гэтыя вобласці размеркавання магчыма прывязаць да ізатэрмаў: дадатныя зарады месцяцца вышэй узроўня ізатэрмы -30°C , адмоўныя – паміж вышынямі ізатэрмаў -5°C і -30°C , дадатковая невялікая вобласць дадатных зарадаў знаходзіцца паміж узроўнем замярзання і ізатэрмай -5°C . Патрэбна адзначыць, што падобнае размеркаванне назіраецца не ва ўсіх выпадках: яно ўласціва $2/3$ назіраных *Cumulonimbus*, у астатніх яно зваротнае. Змяненне палярнасці воблака звычайна адбываецца падчас яго разбурэння, калі дэфармуюцца паветраныя плыні, якія пераносяць часцінкі-носьбіты ўнутры яго. Таксама ў выніку змяншаюцца напружанне поля і велічыня зарадаў. Яшчэ неабходна адзначыць, што невялікі дадатны зарад у ніжняй частцы (як на мал. 3.3.1.) таксама існуе не заўжды – 5-10% воблакаў яго не маюць. Але не ўсе даследчыкі з гэтым згодны: па меркаванню большасці амерыканскіх вучоных, дадатны зарад у ніжняй частцы воблака ёсць ва ўсіх навальнічных, таму гэта верная прыкмета актыўнасці [51] – у той жа час як назіранні савецкіх даследчыкаў паказалі, што, сапраўды, развітых навальнічных аблакаў без гэтага невялікага цэнтра засяроджвання амаль што няма, але на папярэдніх стадыях яго можа і не быць.

Зараз разгледзім носьбіты зарадаў навальнічных воблакаў. Па-першае, неабходна адзначыць, што забяспечыць такія высокія значэнні характарыстык поля тым жа шляхам, з дапамогай якога ствараецца агульнае электрычнае поле атмасферы, нельга – іёны не здольны пераносіць такія вялікія зарады, і іх не можа ўтварацца вельмі шмат. У воблаках носьбітамі зараду з'яўляюцца ледзяныя крышталі і, у меншай ступені, кроплі вады – гэта і ёсць ключавое адрозненне паміж палямі. Велічыня зараду залежыць ад фізічнага стану часцінак (крышталі здольны назапашваць куды большы зарад, чым кроплі), а таксама іх памераў: напрыклад, пры радыўсе $r=1$ мм найбольшы зарад можа дасягаць 240 пКл ($1 \text{ пКл} = 10^{-12} \text{ Кл}$), а пры $r=0,01$ мм – 5 пКл. Але з-за перавагі неправильных формаў у часцінак простае залежнасці паміж памерамі і велічыняй зарада на іх няма – суадносіны не ўзгадняюцца з індукцыйным механізмам узнікнення зараду. Таксама велічыня зараду вызначаецца інтэнсіўнасцю трэння паміж часцінкамі – дарэчы, асноўнай прычынай набыцця зараду ледзянымі крышталікамі – і чашчынёй сутыкненняў паміж імі.

Хаця асноўнымі носьбітамі з'яўляюцца крышталікі, на першых этапах фарміравання навальнічнага воблака павышэнне напружанасці поля адбываецца з-за павелічэння колькасці іёнаў і захопу іх кроплямі. Гэты працэс выглядае наступным чынам:



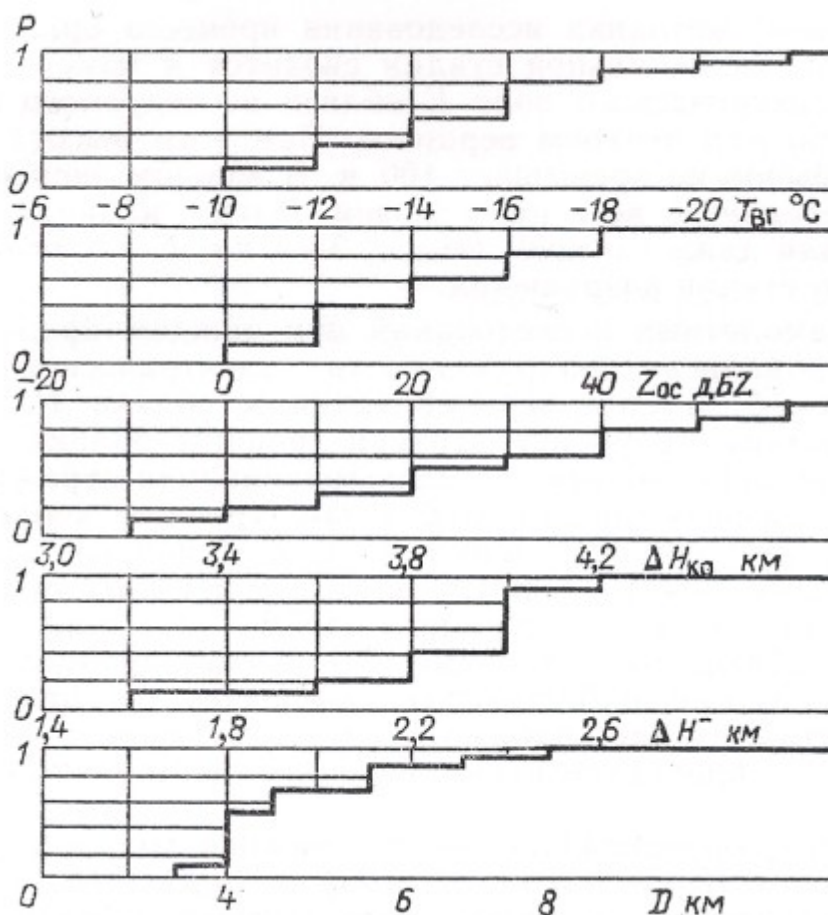
Мал. 3.3.2. Схема захопу іёнаў пры дадатным градыенце патэнцыяла (злева – выпадак, калі кропля рухаецца павольней за іёны, зправа – калі хутчэй) [51]

Калі велічыня агульнага зарада воблака ўжо павялічылася, уступаюць у дзеянне іншыя механізмы набыцця і пераразмеркавання: трэнне, сутыкненні часцінак, іх распад, зліццё, каагуляцыя. Зарад набываецца часцінкамі пры змене электронных абалонак пад знешнімі ўздзеяннямі. Найбольш значная роля трэння, але яна праяўляецца амаль што толькі ў набыцці часцінакамі зарадаў. Роля сутыкненняў у электрызацыі часцінак менш значная, але пераразмеркаванне зарадаў у воблаке адбываецца дзякуючы менавіта яму. Механізм наступны: пры трэнні часцінка набывае зарады абодвух знакаў, але пры сутыкненні першасныя носьбіты распадаюцца, і (з-за таго, што зарады засяроджваюцца на паверхні) ў выніку новаўтварэння часцінкі набываюць зарад пераважна аднаго знака – дробныя становяцца адмоўна зараджанымі, буйныя набываюць дадатны зарад; для ледзяных часцінак уласціва адваротнае размеркаванне – лёд больш структураванае рэчыва, чым вада, таму пераразмеркаванне зарадаў у ім адбываецца па-іншаму. Паколькі менавіта ледзяныя часцінкі і з’яўляюцца галоўнымі носьбітамі зараду, то ўтвараецца назіранае размеркаванне зарадаў у воблаке: цяжкія адмоўна зараджаныя канцэнтруюцца ў ніжніх слаях, лёгкія дадатна зараджаныя – у верхніх. Патрэбна адзначыць, што не ўсе часцінкі здольныя сутыкацца паміж сабой: аэрадынамічныя сілы пачынаюць ўплываць на целы ўжо на мікраскапічных узроўнях. Гэтымі пытаннямі займаліся Ф. Альбрэхт, А. Х. Хргіан, І Ленгмюр [68]. Згодна іх даследаванням, часцінка здольна сутыкнуцца з іншай толькі тады, калі яе памер не так значна перавышае (ці не настолькі меншы) за памер другой. Калі ліміт будзе перасягнуты, то дробная часцінка будзе проста агінаць буйную.

Асобна каштуе адзначыць уплыў каагуляцыі. Гэты працэс, у адрозненне ад папярэдніх, не прыводзіць да фарміравання новых зарадаў, але ён здольны значна паўплываць на іх велічыню: так, калі 1000 кропель аднолькавага памера і з аднолькавым зарадам зліюцца разам, то дыяметр новаўтворанай кроплі будзе ўсяго ў 10 разоў большым за дыяметр зыходнай кроплі, а вось зарад будзе

большы за зыходны ў 100 разоў. Верагоднасць таго, што адбудзецца каагуляцыя, вылічваецца з дапамогай спецыяльнага каэфіцыента.

Уласна пад электрызацыяй навальнічных воблакаў разумеюць магчымасць набывання зараду, дастатковага для спараджэння маланкі. Утварыцца такі зарад можа толькі пры ўзаемадзеянні крышталікаў, таму пры вывучэнні з'явы электрызацыі разглядаюць менавіта працэсы, якія адбываюцца з ледзяной фазай воблака. Найбольш надзейны спосаб вызначаць іх характарыстыкі – гэта непасрэдныя замеры ўнутры воблака. Але гэта складана, небяспечна і дорага каштуе, таму на практыцы выкарыстоўваюцца ускосныя характарыстыкі. Хаця гэта памяншае дакладнасць, але па ім магчыма вызначаць інтэнсіўнасць электрызацыі, верагоднасць яе пачатку і яе ступень. С. М. Гальперын, Л. В. Кашлева, Ю. П. Міхайлоўскі і В. Д. Сцепаненка [55] разглядалі залежнасць верагоднасці пачатка электрызацыі канвекцыйных воблакаў ад іх тэмпературы верхняй мяжы ($T_{вг}$), гарызантальных памераў (D), радыялакацыйнай адбівальнасці (вертыкальны разрэз) над і пад узроўнем кандэнсацыі ($Z_{об}$ і $Z_{ос}$ адпаведна), вышыняў верхняй мяжы ($H_{вг}$), таўшчыні самага канвекцыйнага воблака ($\Delta H_{ко}$), таўшчыні пераахалоджанай часткі (ΔH^-), якія вызначаліся па дадзеных радарных вымярэнняў і візуальнага стану вяршыні (BCB), які ацэньваецца ў балах. Атрымаўся наступны вынік:



Мал. 3.3.3. Змяненні верагоднасці пачатка элетрызацыі ў залежнасці ад параметраў воблака [55]

Набходна адзначыць, што электрызацыя навальнічнага воблака цесна звязана з яго развіццём і ростам: так, набыццё воблакам электрычнага зараду – такі ж нераўнамерны працэс, як і яго рост. Але пры гэтым для ўсіх воблакаў максімум электрычнай магутнасці адпавядае стадыі найбольшага развіцця, а разбурэнне поля пачынаецца з дысіпацыяй.

Зараз разгледзім найбольш яркую праяву атмасфернай электрычнасці – маланку. Увогуле маланка гэта электрычны іскравы разрад гіганцкіх памераў, які адбываецца падчас навальніцы і суправаджаецца яркім выбліскам святла і моцным гукам – громам. Яны ўзнікаюць паміж двума абласцямі засяроджання зарадаў розных знакаў і выклікаюць частковую ці поўную іх нейтралізацыю. Паколькі такія скупнасці маюцца як унутры воблакаў, так і на паверхні зямлі, то маланкі могуць праскокваць паміж аблокамі і зямлёй, паміж рознымі аблокамі і паміж верхняй і ніжняй часткамі аднаго воблака.

Калі перайсці да канкрэтных колькасных характарыстык маланак, то яны будуць наступнымі: сіла току – у межах 10000-100000 ампер, напружанасць – да 50 млн. вольт, напружанасць электрычнага поля вакол месца праходжання маланкі – да 25-50 кВ/м, велічыня зараду, які можа перанесці адна маланка, складае да 20-50 Кл, даўжыня – у сярэднім каля 2-4 км, хаця можа дасягаць і 20-25 км, хуткасць распаўсюджвання (у залежнасці ад стадыі) – ад $1,5 \cdot 10^7$ см/с да амаль $2 \cdot 10^8$ см/с.

Вывучаць уласцівасці маланкі як электрычнай з’явы неабходна зыходзячы з таго, што гэта іскравы разрад. Згодна тэрміну, гэта адна з формаў электрычных разрадаў у газах, якая ўзнікае ў выпадках, калі магутнасці крыніцы энергіі не хапае на падтрымліванне дугавога ці цьмеючага разрадаў, і які характарызуецца кароткім часам існавання і разгалінаванай формай. У астатнім іскравы разрад падобен да іншых: з’яўляецца пры электрычным прабоі паветра, ток цячэ па плазме, якая ўзнікае пры іянізацыі і г.д. Па сваіх памерах і магутнасці выдзяляюцца іскры кароткія і доўгія. Маланкі адносяцца да групы доўгіх іскар.

Іскравыя разрады – як кароткія, так і доўгія – даволі зручна ствараць у лабараторных умовах. І хаця памеры і магутнасць разрадаў, ствараемых штучна, у разы меншыя, чым у прыродных, але працэсы, якія ў іх адбываюцца, падобны і праходзяць абсалютна аднолькавым чынам. Такія даследванні заключаюцца ў рэгістрацыі характарыстык іскар з дапамогай розных сродкаў, а таксама іх высокахуткастнай здымцы. Дзякуючы падобным эксперыментам стаў вядомым факт неаднароднага хода развіцця іскар. Выдзяляюцца чатыры стадыі:

- каронную;
- лідарную;
- канальную (галоўную);
- дугавую.

Дадзім кароткую характарыстыку кожнай з іх.

Каронная стадыя. Гэта самы першы этап фарміравання іскры, пры якім яшчэ не адбыўся электрычны прабоі паветра. Падчас праходжання гэтай стадыі магчыма вылучыць две ступені. На першай з’яўляецца сама карона – звычайна

невялікая вобласць слабога свячэння, якая суправаджаецца ледзь заўважным шыпячым гукам. Падчас яе зараджання часцінкі распаўсюджваюцца адносна раўнамерна ва ўсе бакі ад крыніцы энергіі. На другой ступені пачынаюць узнікаць стрымеры – невялікія вузкія каналы, якія запоўнены плазмай і таму свецяцца. Яны існуюць вельмі кароткі прамежак часу – не болей за 10^{-7} с. Іх з’яўленне папярэднічае прабою, бо фарміраванне каналаў сведчыць аб тым, што іянізаваны газ пачаў скоплівацца ў месцах, дзе хуткасць распаўсюджвання току большая, чым у навакольным асяроддзі. Каронныя разрады – слабыя. Значэнні велічынь сілы тока і напружанасці электрычнага поля ў іх у тысячы разоў меншыя за велічыні, якія рэгіструюцца падчас канальнай стадыі. Таму іх рэдка калі магчыма ўбачыць – каронныя разрады заўважны звычайна толькі ў цёмны час сутак і назіраюцца на вяршынях лёзаў (з’ява агней Св. Эльма).

Лідарная стадыя. Яе прыкметай з’яўляецца вылучэнне аднаго са стрымераў, які хутка перасільвае ўсе астатнія і пачынае прасоўванне да цэнтра засяроджання зарада з процілеглым знакам. Менавіта тады пачынаецца рух зараджаных часцінак не ва ўсе бакі, а ў пэўным напрамку. Стрымер, які становіцца каналам распаўсюджвання зараду, і называецца лідарам. Яго пярэдня частка, якая ажыццяўляе іянізацыю навакольнага паветра і гэтым забяспечвае далейшы рост, называецца пілотам лідара (тэрмін амерыканскага паходжання [58], таму на славянскіх мовах гучыць не вельмі ўдала). Падчас прасоўвання ад лідара ва ўсе бакі адыходзяць шматлікія адгалінаванні, але большасць з іх хутка знікае. Так адбываецца таму, што ён, магчыма сказаць, “навобмацак” пракладае сабе шлях да процілеглага цэнтра засяроджання – шукае найбольш аптымальныя шляхі іянізацыі паветра, якія патрабуюць найменшых выдаткаў энергіі. Важнейшай уласцівасцю лідара з’яўляецца тое, што ён расце не пастаянна, а скачкападобна: накіпюшы энергію, пілот лідара ажыццяўляе іянізацыю навакольнага паветра і пры гэтым прасоўваецца наперад, затым ён спыняецца на некалькі нанасекундаў, а потым, аднавіўшы запас энергіі, ажыццяўляе чарговы крок. З-за гэтай рысы хуткасць руха лідара (фактычна, хуткасць цячэння току) у дзясяткі і сотні разоў меншая за значэнні паказчыка для канальнай стадыі і складае каля $1,5 \cdot 10^7$ см/с. Пры росце іскры з-за аднамаментнай іянізацыі каласальнай колькасці часцінак і, такім чынам, рэзкага пашырэння газаў паветра, ствараецца выбухападобны эфект, які суправаджаецца адпаведнай гукавой хваляй – гromам. Гром заўсёды чуецца пасля выбліску, бо хуткасці распаўсюджвання святла і гукаў паветраным асяроддзі значна адрозніваюцца паміж сабой. Нярэдка падчас адной грывоты можна пачуць некалькі “выбухаў”, якія ідуць следам адзін за адным і амаль што зліваюцца – гэта наступства скачкападобнага прасоўвання лідара.

Канальная стадыя. Яна пачынаецца тады, калі лідар іскры даходзіць да цэнтра засяроджання зарадаў процілеглага знака ці злучаецца з лідарам, які ад гэтага цэнтра адыходзіць. У выніку ўтвараецца канал плазмы з высокай праводнасцю, і хуткаць цячэння току адразу павялічваецца на парадкі (да $5 \cdot 10^{10}$ см/с). Сіла току і напружанасць таксама становяцца большымі, а супраціўленне падае, бо энергія на іянізацыю ўжо не патрэбна. Дарэчы, з-за

розніцы ў хуткасцях цячэння току падчас лідарнай і канальнай стадыях і ствараецца ілюзія таго, што маланка б'е з зямлі ў аблокі – у большасці выпадкаў лідар пачынае прасоўванне менавіта з воблака, хаця адваротныя выпадкі таксама маюць месца. Рэзкага скачок ў хуткасці цячэння току таксама стварае выбухападобныя эфекты з адпаведнымі наступствамі.

Дугавая стадыя. Стадыя, падчас якой ажыццяўляецца цячэнне току да таго часу, пакуль ёсць энергія ў крыніцах, і пасля якой іскра спыняе сваё існаванне. На гэтай стадыі – у абсалютнай большасці выпадкаў – ажыццяўляецца нейтралізацыя зарадаў абласцей засяроджвання.

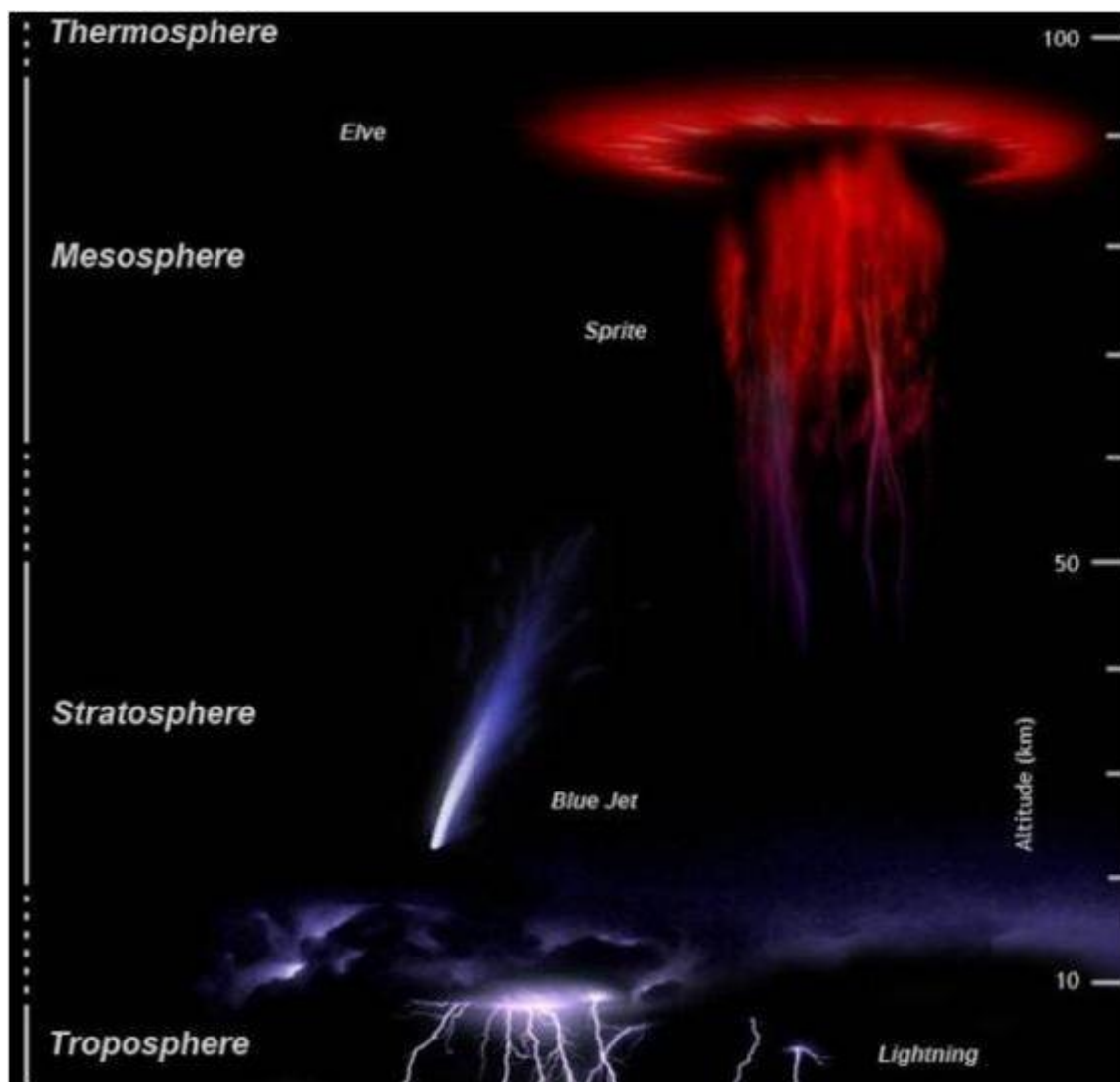
Пасля таго, як ток перастаў цячы па каналу, іянізаванае паветра захоўваецца яшчэ некаторы час. А паколькі носьбітаў зараду ў ім куды болей, чым у навакольным паветры, то па ўжо створанаму каналу могуць распаўсюджвацца новыя лідары, прычым з большай хуткасцю – да $2 \cdot 10^8$ см/с. І цыкл паўтараецца з пачатку: карона – лідар – канал – дуга. Так можа адбывацца да некалькіх дзесяткаў разоў падрад, пакуль канал іянізаванага паветра не будзе зруйнаваны. Гэта з'ява растлумачвае мігаценне маланкі.

Хаця было праведзена шмат даследванняў маланак і навальнічнай электрычнасці, але і дагэтуль шэраг пытанняў застаецца невысветленым. Так, усё яшчэ вядуцца даследванні таго, як наяўнасць электрычных зарадаў уплывае на мікрафізічныя працэсы. Дагэтуль невядомы “трыгерны механізм” маланкі – ёсць толькі асобныя гіпотэзы: першая з іх сцвярджае, што іскра ўзнікае сама, калі назапашваецца дастатковы зарад, другая – што ядра кандэнсацыі і замярзання падштурхоўваюць астатнія часцінкі “вызваліць” зарад, трэцяя – што трыгерам з'яўляюцца часцінкі касмічнага паходжання.

Найбольш яркім доказам таго, што яшчэ далёка не ўсе электрычныя атмасферныя працэсы вывучаны, служыць выяўленне так званых маланак верхняй атмасферы. Гэта адкрыццё было цалкам выпадковым: у 1989 годзе каманда вучоных здымала навальніцу ў Паўднёвай Дакоце (ЗША), і выявіла, што над воблакамі на вельмі кароткі тэрмін узнікаюць велізарныя зіхатлівыя ўтварэнні эліпсоіднай формы [7]. Яны былі названы спрайтамі. Даследванні, якія хутка пачаліся, выявілі, што на самой справе яны маюць дрэвападобную форму, і – у адрозненне ад электрычных разрадаў трапасферы – яны каляровыя: чырвоныя ўверсе, блакітна-фіялетавыя ўнізе. Таксама было высветлена, што яны з'яўляюцца адначасова з трапасфернымі маланкамі. На аснове гэтага было выказана меркаванне, што звычайныя маланкі і маланкі верхніх слаёў уяўляюць сабой адзін разрад, які ахоплівае ўсю вобласць паветра паміж двума галоўнымі абласцямі засяроджвання зарадаў у агульным электрычным полі атмасферы – паверхняй зямлі і іянасферай – і дзякуючы якому шляхам нейтралізацыі падрымліваецца баланс зарадаў. Наступныя назіранні не змаглі поўнасцю пацвердзіць гэтую гіпотэзу (бо яны надзвычай складаныя), але яны паказваюць, што на самой справе, хутчэй усяго, так яно і ёсць.

Але спрайты – не адзіная форма маланак верхняй атмасферы. Акрамя іх часам фіксуюцца такія рэдкія віды як сінія бруі і эльфы (ад англійскага “ELVES – Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations due to

Electromagnetic Pulse Sources” (Выкіды святла і вельмі нізкай частаты абурэння з-за электрамагнітных імпульсных крыніц)). Першыя з іх уяўляюць падобныя да спрайтаў дрэвападобныя разрады, але, у адрозненне ад іх, якія з’яўляюцца непасрэдна з воблака. Эльфы жа ўяўляюць сабой велізарныя кольца святла, якія ўзнікаюць на вельмі высокіх узроўнях на надзвычай кароткі адрэзак часу. Увогуле, гэтыя тыпы магчыма адлюстравач з дапамогай наступнай схемы:



Мал. 3.3.4. Віды маланак верхніх слаёў атмасферы [105]

Нягледзячы на тое, што гэтыя маланкі маюць розныя формы, іх аб’ядноўвае шэраг уласцівасцяў. Па-першае, усе яны маюць памеры ў разы большыя за звычайныя маланкі: яны як мінімум дасягаюць 20 км у даўжыню (самыя дробныя сінія бруі), а спрайты “вырастаюць” да 110-130 км у вышыню і да 30-50 км у дыяметры; кальцо эльфа можа дасягаць да 300-400 км у папярочніку. Па-другое – гэта вельмі кароткі нават пры параўнанні з трапасферанай маланкай час існавання: не болей за 10-12 мс (для эльфаў – не болей за 3-5 мс ці нават меней). Па-трэцяе – яны ва ўсіх выпадках з’яўляюцца прама над трапасфернымі маланкамі, бо, па сутнасці, ўяўляюць сабой адзін разрад.

Акрамя формы яны адрозніваюцца толькі месцам, з якога пачынаюць распаўсюджвацца: сінія бруі ўзнікаюць яшчэ ў трапасферы ці ніжняй стратасферы, спрайты – у верхняй стратасферы, а эльфы – у мезасферы ці нават вышэй (да 100 км). Такія адрозненні тлумачацца тым, што ўсе маланкі верхняй атмасферы – люменісцэнтныя з’явы, якія выкліканы праходжаннем тока праз воблака іянізаванага газу, а не па засяроджаным канале, як для трапасфернай маланкі (гэта, у сваю чаргу, дае яшчэ адно адрозненне: трапасферныя маланкі свецяцца толькі дзякуючы пераўтварэнню газа ў плазму, а страта- і мезасферныя – дзякуючы пераходу атмамаў ва ўзбуджаны стан). Канкрэтныя значэнні колькасных паказчыкаў электрычнага поля гэтых з’яў з-за скаладанасці вывучэння яшчэ не атрыманы – адзінае выключэнне складаюць спектраграмы. Але, нягледзячы на малую колькасць дадзеных, на аснове меркавання аб тым, што абодва віда маланак уяўляюць сабой адзін разрад, робяцца спробы іх мадэлявання, у тым ліку матэматычнага.

У пачатку бягучага стагоддзя быў выяўлены факт стадыяльнасці развіцця маланак верхняй атмасферы – у першую чаргу спрайтаў. Гэта робіць іх яшчэ больш падобнымі да трапасферных маланак, хаця размежаванне стадый з-за кароткага перыяду існавання складана.

Напрыканцы каштуе адзначыць такія цікавыя феномен, як шаравая маланка. Звычайна яны ўяўляюць сабой згусткі святла сфероіднай ці, радзей, эліпсаідальнай формы памерам ад 10-20 см да 1,5 м (рэкорд – 30 м), якія звычайна ўзнікаюць падчас навальніц і адрозніваюцца вельмі спецыфічнымі ўласцівасцямі. Так, хаця яны часцей усяго і звязаны з навальніцамі, але могуць з’яўляцца пры любым надвор’і, яны здольны рухацца па-за залежнасці ад ветру – нават падчас штылю, яны не рэагуюць на маланкаадводы і могуць пранікаць у памяшканні скрозь самыя дробныя шчыліны. Звычайна яны белыя ці жоўтыя, але бываюць усіх колераў вясёлкі. З-за нетыповасці паводзін яны лічацца анамальнай з’явай. Існуе шмат гіпотэз для тлумачэння дадзенага феномена, але пацвердзіць іх на сённяшні час немагчыма, бо не атрымліваецца набыць узор для вывучэння (усе эксперыменты па лабараторнаму мадэляванню правальваліся). Больш таго, за стагоддзі назіранняў і дзясяткі год даследванняў не было створана нават дакладнай канцэпцыі. Таму падобныя таямніцы – гэта мэты даследванняў будучыні.

3.4. ПРАСТОРАВАЕ І ЧАСАВАЕ РАЗМЕРКАВАННЕ КАНВЕКЦЫЙНЫХ ВОБЛАКАЎ І НАВАЛЬНІЦ ПА ТЭРЫТОРЫІ БЕЛАРУСІ

Методыка выканання работы была апісана ў раздзеле 2. Таму зараз магчыма перайсці адразу да вынікаў аналізу дадазеных. Іх магчыма прадставіць у выглядзе наступных табліц:

Табліца 3.4.1. Асноўныя заканамернасці па тэрмінах назірання

Параметры	За год	За цёплы перыяд	За халодны перыяд
Колькасць тэрмінаў назірання	660	449	211
Сярэдні тэрмін	12:30	13:20	10:40
Сярэдняя вышыня аблокаў	648,7 м	778,3 м	388,4 м
Сярэдняя воблачнасць	74,4%	64,3%	96,0%
Колькасць тэрмінаў з навальніцамі	30	29	≈0
Колькасць тэрмінаў з Cu	261	240	22
Колькасць тэрмінаў з Cb	160	147	15
Колькасць тэрмінаў з Cu + St	230	55	175
Колькасць тэрмінаў з Cu + Cb	7	7	0
Колькасць тэрмінаў з дажджом	235	176	60
Колькасць тэрмінаў са снегам	105	3	101
Колькасць тэрмінаў са змешанымі ападкамі	5	1	4

Табліца 3.4.2. Асноўныя заканамернасці за шматгадовы перыяд

Параметры	Сярэдняе	Мінімум	Максімум
Колькасць дзён з навальніцай	23,7	7 (Пінск, 1996)	44 (Васілевічы, 2010)
Колькасць пахмурных дзён па ніжняй воблачнасці	67,3	23 (Навагрудак, 1999)	141 (Вілейка, 2008)
Колькасць дзён з ападкамі	166	127 (Клічаў, 2002)	210 (Навагрудак, 2010)
Працягласць вадкіх ападкаў (гадзіны)	532,5	264 (Пінск, 2011)	895 (Палесская, 1993)

Працягласць цвёрдых ападкаў (гадзіны)	329,4	67 (Пінск, 2008)	659 (Орша, 2004)
Паўтаральнасць кучавых воблакаў (%)	6,9	2 (Клічаў – 4 гады)	14 (Палесская, 1997)
Паўтаральнасць кучава-дажджавых воблакаў (%)	8,1	0 (Лепель – 4 гады)	28 (Ліда, 1995)
Паўтаральнасць слаістых воблакаў (%)	7,8	1 (неаднакратныя выпадкі)	15 (Верхнядзвінск, 2003)
Паўтаральнасць слаіста-дажджавых воблакаў (%)	4,3	1 (неаднакратныя выпадкі)	9 (Лепель, 1998; Орша – 3 гады)

Спачатку разгледзем вынікі першага этапа задання. Для ўсіх станцый адзначаецца, што большасць выпадкаў назіранняў канвекцыйных воблакаў (больш за 2/3) прыпадае на цёплы перыяд года – красавік-кастрычнік, што ў гэты тэрмін назіраюцца практычна ўсе выпадкі навалніц, што сярэдняя вышыня воблакаў змяняецца на працягу года – летам яна амаль ў два разы большая за зімовыя значэнні, што падчас назіранняў воблачнасць звычайна даволі высокая – 5-7 балаў і болей, што, нягледзячы на розніцу ў колькасці тэрмінаў і працягласці перыядаў, за халодную і цёплую поры года назіраюцца падобныя колькасці выпадкаў выпадзення ападкаў з канвекцыйных воблакаў, што ў халодны перыяд года не злучаныя з яруснымі канвекцыйнымі воблакамі назіраюцца вельмі рэдка (менш 10% ад усіх выпадкаў). Яны тлумачацца сезоннымі адрозненнямі, якія ўласцівы для ўсёй тэрыторыі Беларусі: развіццё канвекцыйных воблакаў патрабуе значных колькасцяў цеплыні і вільгаці, таму большая колькасць выпадкаў адзначаецца менавіта ў цёплы перыяд, і таму павялічваецца сярэдняя вышыня воблакаў (бо падымаецца і ўзровень кандэнсацыі) – у зімовы перыяд канвекцыйныя воблакі развіваюцца амаль што выключна на франтах, таму часта звязаны з яруснымі воблакамі, і з іх куды часцей выпадаюць ападкі (каля 78% супраць 40% для цёплага перыяда; у сярэднім за год атрымліваецца 52% ад усіх тэрмінаў назірання). Акрамя названых заканамернасцяў магчыма адзначыць яшчэ дзве прыкметныя асаблівасці. Так, сярэднія вышыні воблакаў паступова зніжаюцца пры прасоўванні з поўдня на поўнач: пры сярэднім значэнні ў 648,7 м за год яна змяняецца ад 704,3 м у Васілевічах і 680,3 м у Пінску да 632,5 м у Лепелі і 605,7 м у Лынтупах. Гэта звязана са змяненнем сярэдніх тэмператураў, ад якіх залежыць вышыня ўзроўня кандэнсацыі, а таксама адрозненнях у сярэдніх абсалютных вышынях (поўнач Беларусі мае пераважна раўнінны і ўзвышаны рэльеф, а поўдзень – нізінны). Але з парадку выбіваюцца Баранавічы (615,7 м) – гэта магчыма растлумачыць уплывам месцазнаходжання ля Навагрудскага ўзвышша. Яшчэ адна асаблівасць складаецца ў тым, што развіццё канвекцыйных воблакаў адзначаецца, як і мае быць, у другой палове дня ў тэрміны 12, 15 і 18 гадзін, але сярэдні тэрмін за суткі, калі назіраюцца воблакі

вертыкальнага развіцця, складае 12:30 – летам гэта 13:20, а зімою 10:40. Тлумачэнне падобнага зруху адно – уплыў атмасферных фронтаў, на якіх (хаця і з рознай хуткасцю) канвекцыйныя воблакі могуць без перашкод развівацца на працягу ўсіх сутак.

Хаця дадзеныя назіранняў па тэрмінах дазваляюць прасачыць шмат заканамернасцяў размеркавання навальніцаў і канвекцыйных воблакаў па тэрыторыі Беларусі, але яны таксама паказваюць, што умовы – у першую чаргу асаблівасці паверхні – даволі аднародныя. Гэта пацверджвае хаатычны характар размеркавання найбольшых і найменшых значэнняў паказчыкаў. Напрыклад, пры сярэднім значэнні 660 тэрмінаў назіранняў за год значэнні па станцыях змяняюцца ад 366 у Клічаве да 974 у Баранавічах і Васілевічах, пры сярэднім колькасці ў 30 тэрмінаў знавальніцамі значэнні вар’іруюцца ад 17 у Клічаве, 18 у Лепелі і 20 у Баранавічах да 64 у Васілевічах. Такія хістанні магчыма было б растлумачыць розніцай умоў надвор’я ў розныя гады, а таксама рознай ступенню дакладнасці назіранняў (так, Васілевічы – гэта апорная метэастанцыя, а ў Баранавічах знаходзіцца буйная ваенная авіябаза, таму там назіранні праводзяцца больш старанна), але гэта былі б толькі частковыя прычыны.

Таксама каштуе адзначыць яшчэ шэраг фактаў. Так, раней узгадвалася, што ў халодны перыяд года канвекцыйныя воблакі назіраюцца пераважна разам з яруснымі, а ў цёплы – часцей “самастойна”. Цікава тое, што пераход ад аднаго “рэжыму” да іншага на ўсіх шасці разгледжаных станцыях занімаў вельмі кароткі тэрмін – усяго 1-1,5 тыдні. На ўсіх станцыях навальніцы фіксаваліся тады, калі назірался толькі кучава-жажджавыя воблакі, але ў прыкладна 5% выпадкаў адначасова з імі адзначаліся і звычайныя кучавыя. І яшчэ сутачны ход колькасці і магутнасці воблакаў адзначаўся толькі ў цёплы перыяд – зімою 3-за актыўнай фронтальнай дзейнасці адсачыць яго было нельга.

Перад тым, як перайсці да аналізу вынікаў другога этапа работы, неабходна сказаць, што ў электронных архівах РГМЦ Беларусі, сведкі з якога і выкарыстоўваліся для выканання задання, прыведзены параметры нярэдка адрозныя ад тых, што магчыма атрымаць з непасрэдных дадзеных назіранняў, і вывесці з іх неабходныя немагчыма. Таму былі выкарыстаны паказчыкі найбольш блізкія да тых, што разгледжваліся ў першым этапе работы.

Напрыклад, у гэтых архівах няма звестак пра ападкі менавіта з канвекцыйных воблакаў – ёсць дадзеныя пра агульныя колькасці. Калі ўзяць колькасць дзён з ападкамі, то яна складзе 166 (46,6%) пры змяненнях ад 153 у Клічаве да 183 у Навагрудку. Гэтае значэнне вельмі блізкае да таго, што атрымалася пасля аналізу дадзеных па тэрмінах – з улікам колькасці ясных і малавоблачных дзён, а таксама выпадзення ападкаў з ярусных воблакаў атрымаецца добрае супадзенне. Працягласці выпадзення ападкаў у архівах прыведзены ў гадзінах, так што іх даволі зручна параўноўваць з колькасцямі тэрмінаў назіранняў (якія прыходзяцца на кожны трохгадзінны перыяд); значэнне для вадкіх ападкаў складае 532 гадзіны (ад 366 у Пінску да 621 у Высокім), а для цвёрдых – 329 (ад 192 у Пінску да 468 у Оршы). Гэтыя значэнні ненашмат адрозніваюцца ад тых, што былі атрыманы падчас аналізу дадзеных

па тэрмінах. Прычыны гэтага складаюцца ў тым, што ў цёплы перыяд года ярусныя воблакі, з якіх могуць выпадаць ападкаі, менш распаўсюджаны, і таму абсалютна большасць прыходзіцца менавіта на канвекцыйныя воблакі, зімою жа воблакі вертыкальнага развіцця часта адзначаюцца разам з яруснымі, і з іх усіх выпадаюць ападкаі, таму таксама розніца ў значэннях невялікая.

Сярэдняя колькасць дзён з навальніцай па тэрыторыі Беларусі складае 24 дні і змяняецца ад 18 у Пінску да 31 у Васілевічах. Навальніцы могуць рэгістравацца на працягу некалькіх тэрмінаў падчас дня, ці за адны суткі можа адзначацца некалькі навальніц, таму значэнні паказчыкаў і адрозныя. Зменлівасць у колькасці дзён ад года да года можа складаць 20-25 і выразнай геаграфічнай заканамернасці не мае – як і не адзначаецца гадоў, у якія адбывалася значныя змяненні паказчыкаў (толькі невялікі рост адзначаўся у 2007-2010 гадах). Хаця магчыма сказаць, што над заходняй часткай Беларусі і над Беларускай градой фіксуецца крыху большая колькасць навальніц, чым над астатнімі рэгіёнамі. Пры гэтым назіраюцца асобныя “астравы”, дзе адзначаецца павышаная колькасць навальніц. Найбольш значным з такіх “астравоў” з’яўляецца Мазырскае ўзвышша.

Цікавая асаблівасць выяўляецца пасля аналізу звестак па колькасці пахмурных дзён па ніжняй воблачнасці: найменшае значэнне – 41 дзень, фіксуецца ў Навагрудку, дзе адзначаюцца адны з найбольш высокіх па краіне працягласці і колькасці ападкаў (сярэдняе значэнне складае 67 дзён, максімум – 117 – назіраецца ў Вілейке). Прычыну гэтага магчыма растлумачыць тым, што ў Навагрудку куды больш ападкаў выпадае з канвекцыйных воблакаў і воблакаў сярэдняга яруса.

Гаворачы пра паўтаральнасць розных тыпаў воблачнасці, патрэбна сказаць, што з усіх абраных тыпаў найбольшая паўтаральнасць уласціва кучава-дажджавым воблакам (8,1%), далей ідуць слаістыя (7,7%), кучавыя (6,9%) і, нарэшце, слаіста-дажджавыя (4,3%). Варыяцыі ў паўтаральнасці ад станцыі да станцыі складаюць ад 5% для слаіста-дажджавых да 16% для кучава-дажджавых. Гэтыя значэнні зразумелы і добра ўзгадняюцца з вядомымі заканамернасцямі і асаблівасцямі – выключэнне складаюць толькі кучава-дажджавыя воблакі. Прычына такой высокай паўтаральнасці складаецца ў тым, што кучава-дажджавыя воблакі часцей, чым звычайныя кучавыя адзначаюцца ў халодны перыяд года. Такім чынам расцягваецца перыяд з больш высокімі значэннямі, што ў выніку дае значную велічыню паўтаральнасці.

Размеркаванне экстрэмальных значэнняў паказчыкаў па станцыях за шматгадовы перыяд з-за большай колькасці саміх узятых станцый і больш працяглага разглядаемага тэрміну мае яшчэ больш хаатычны характар, чым для першага этапа – прычым часам апіняецца што станцыі, дзе фіксаваліся максімум і мінімум за перыяд, знаходзяцца зусім побач (не болей за 50-70 км). Гэта яшчэ больш выразна паказвае, што тэрытарыяльнае размеркаванне канвекцыйнай воблачнасці і навальніц па Беларусі з-за нязначнасці ў адрозненнях умоў падсілаючай паверхні мае даволі аднародны характар.

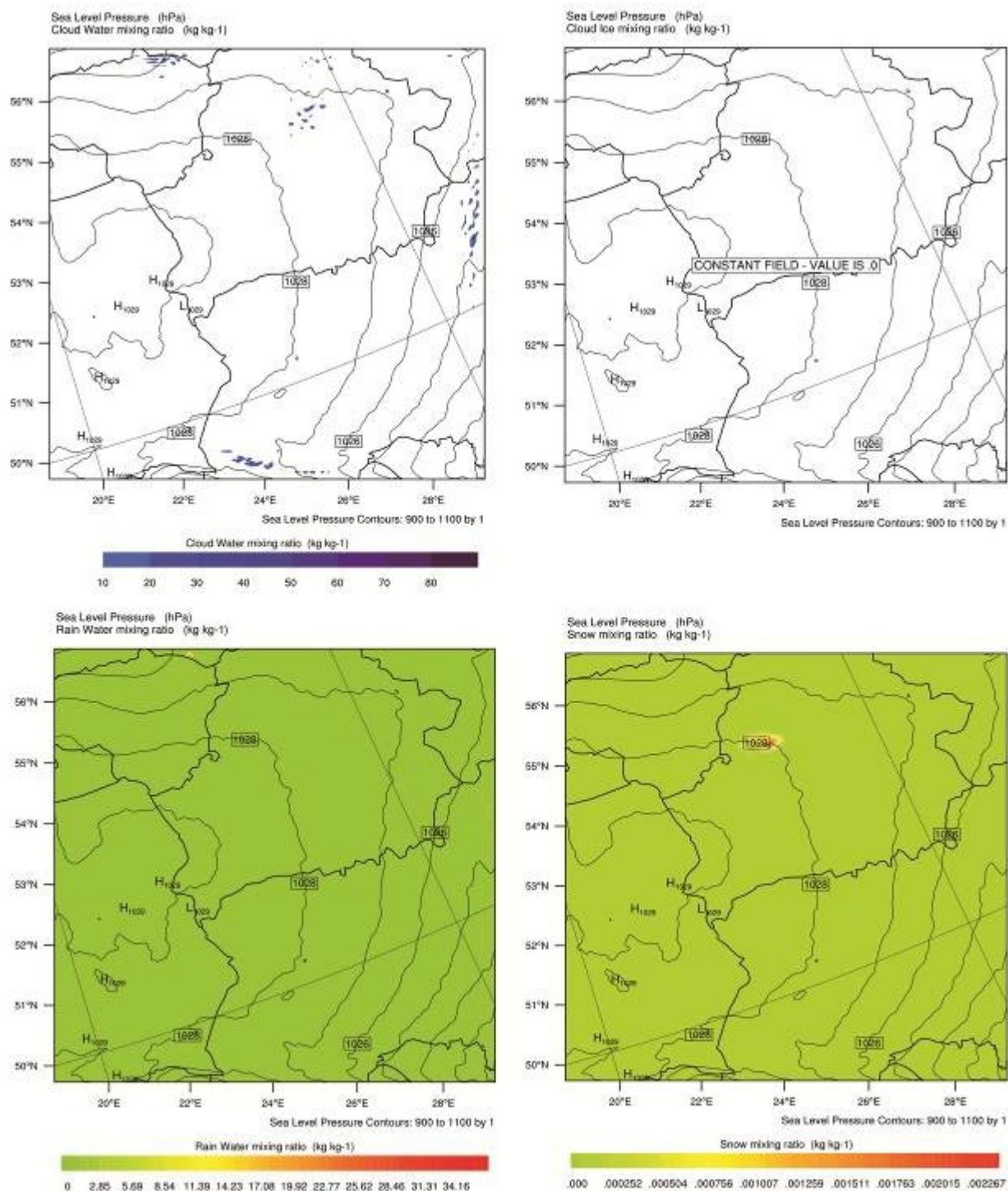
3.5. ВОЧКАВАЯ АРГАНІЗАЦЫЯ КАНВЕКЦЫЙНЫХ ВОБЛАКАЎ І ЯЕ ЗАЛЕЖНАСЦЬ АД ПАДСЦІЛАЮЧАЙ ПАВЕРХНІ

Раней ужо ўзгадвалася, што развіццё канвекцыйнага воблака непасрэдна звязана з развіццём канвекцыйнай вочкі (ці вочкаў у выпадку кучавага моцнага ці кучава-дажджавога воблака). Прыкладная схема працэса прыведзена ў главе 3.1., на Мал. 3.1.1. Цяпер разгледзем яго больш падрабязна.

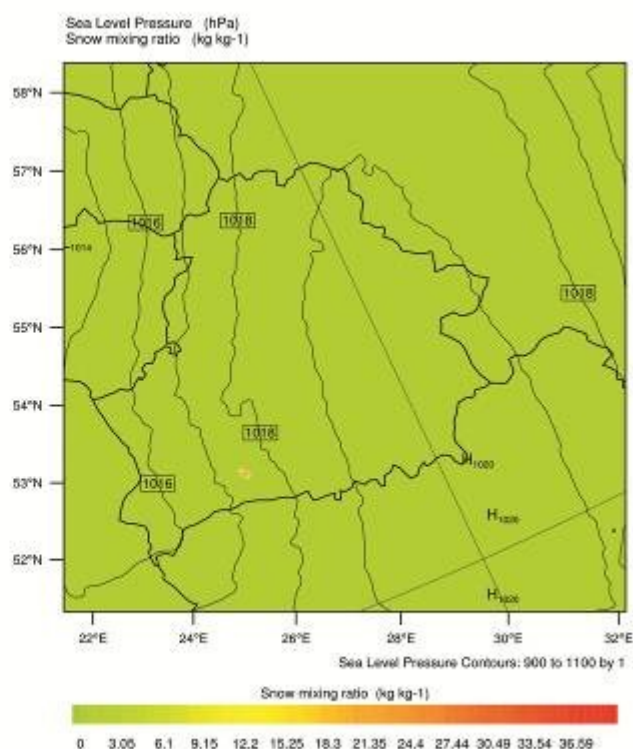
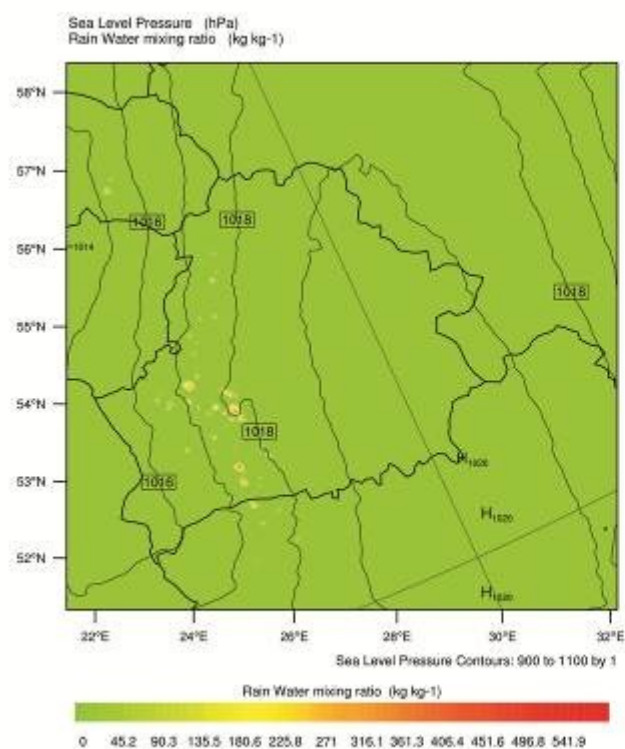
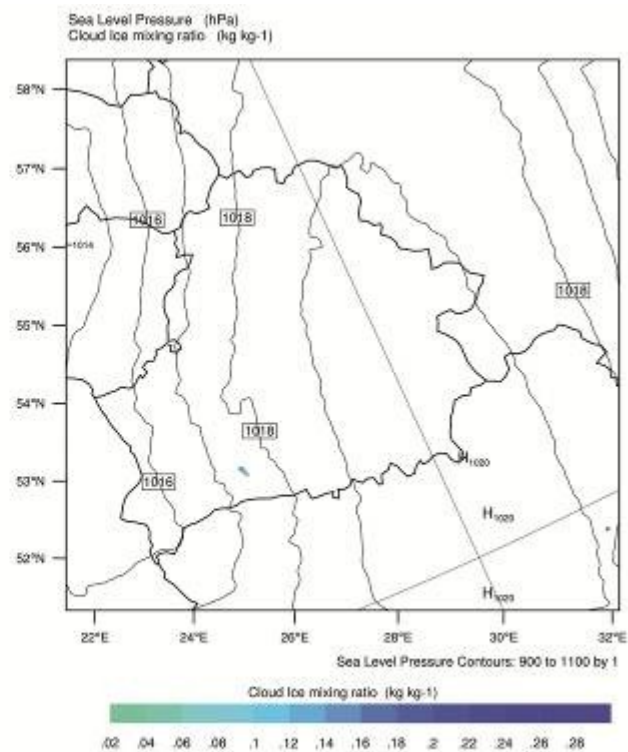
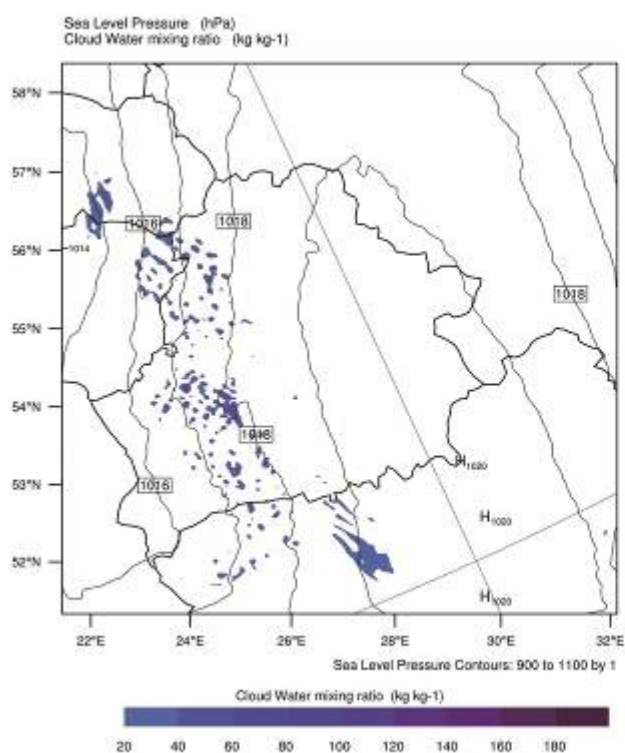
Спачатку неабходна адзначыць, што ўласна канвекцыйная вочка ўяўляе сабой сістэму невялікіх атмасферных плыняў, у цэнтры якой ажыццяўляецца пад’ём, а па ўскраінах – апусканне паветра. Пры адсутнасці ўзбурэнняў, моцных гарызантальных струменяў вочкі (якія магчыма таксама назваць “канвекцыйнымі звёнамі”) маюць форму гексаганальнай калоны – такія вынікі атрымліваліся пры фізічным мадэляванні працэсаў на спецыяльных усталёўках. Але ў рэальнай атмасферы такое назіраецца вельмі рэдка – толькі ва ўстойлівых паветраных масах падчас штылю. Так жа, з-за наяўнасці турбулентнасці і гарызантальных плыняў, форма вочкаў скажаецца, а вертыкальная вось адхіляецца ад нармалі і нярэдка прымае выгляд ламанай лініі. У воблаках вертыкальнага развіцця заўсёды адзначаюцца турбулентнасці і моцныя іншыя вятры, таму вочкі там маюць скажоную форму. Неабходна адзначыць тое, што паколькі буйныя развітыя канвекцыйныя воблакі, якія і цікавяць нас у першую чаргу, звычайна складаюцца з некалькіх звёнаў (фарміраванне супервочкаў – з’ява даволі нячастая), то назіраецца перавышэнне хуткасці сыходных рухаў над узыходнымі: узаемадзеянне з плынямі суседніх звёнаў прыводзіць да таго, што сярэдняя хуткасць сыходных рухаў паялічваецца; таксама гэта звязана з тым, што звычайна вобласць пад’ёму паветра займае большую плошчу, чым вобласць апускання. Сярэдні памер звёнаў складае каля 150-200 м у дыяметры – вызначэнне сярэдніх вышыняў больш складана, бо ў залежнасці ад магутнасці яны могуць быць абмежаваны як на ўзроўні меней за сто метраў слабой інверсіяй, так і выгінаць на 1-1,5 км трапапаўзу. Такое значэнне атрымліваецца таму, што канвекцыя развіваецца па-за залежнасці ад вільготнасці паветра, і ў сухім паветры вочкі звычайна маюць невялікія памеры. Атмасферная вільгаць служыць дадатковай крыніцай энергіі, што ў выніку прыводзіць да павелічэння памераў вочак – так, буйныя кучава-дажджавыя воблакі складаюць вочкі з вышынямі ад 6 да 12 км і ад 2,5 да 6 км у папярочніку. Менавіта высокая адносная – у першую чаргу – вільготнасць прыводзіць да фарміравання воблакаў і да росту памераў вочак, што іх фармуюць.

Гэтыя ж асаблівасці паказваюць і вынікі разлікаў для заданняў па пацверджванні/аспрэчванні сцвярджэння аб тым, што для Беларусі на структуру вочак асаблівасці падсцілаючай павярхні не ўплываюць. Хаця, нягледзячы на выкарыстанне аднолькавай схемы для ўсіх пяці разлікаў, атрымаліся вынікі рознай дакладнасці – наяўнасць навальніцы паказалі разлікі для Лепеля, Навагрудка і Мазыра, разлік для Клічава паказаў навальніцу на значным аддаленні ад метэастанцыі ў тэрмін назірання, а разлік для Пінска не

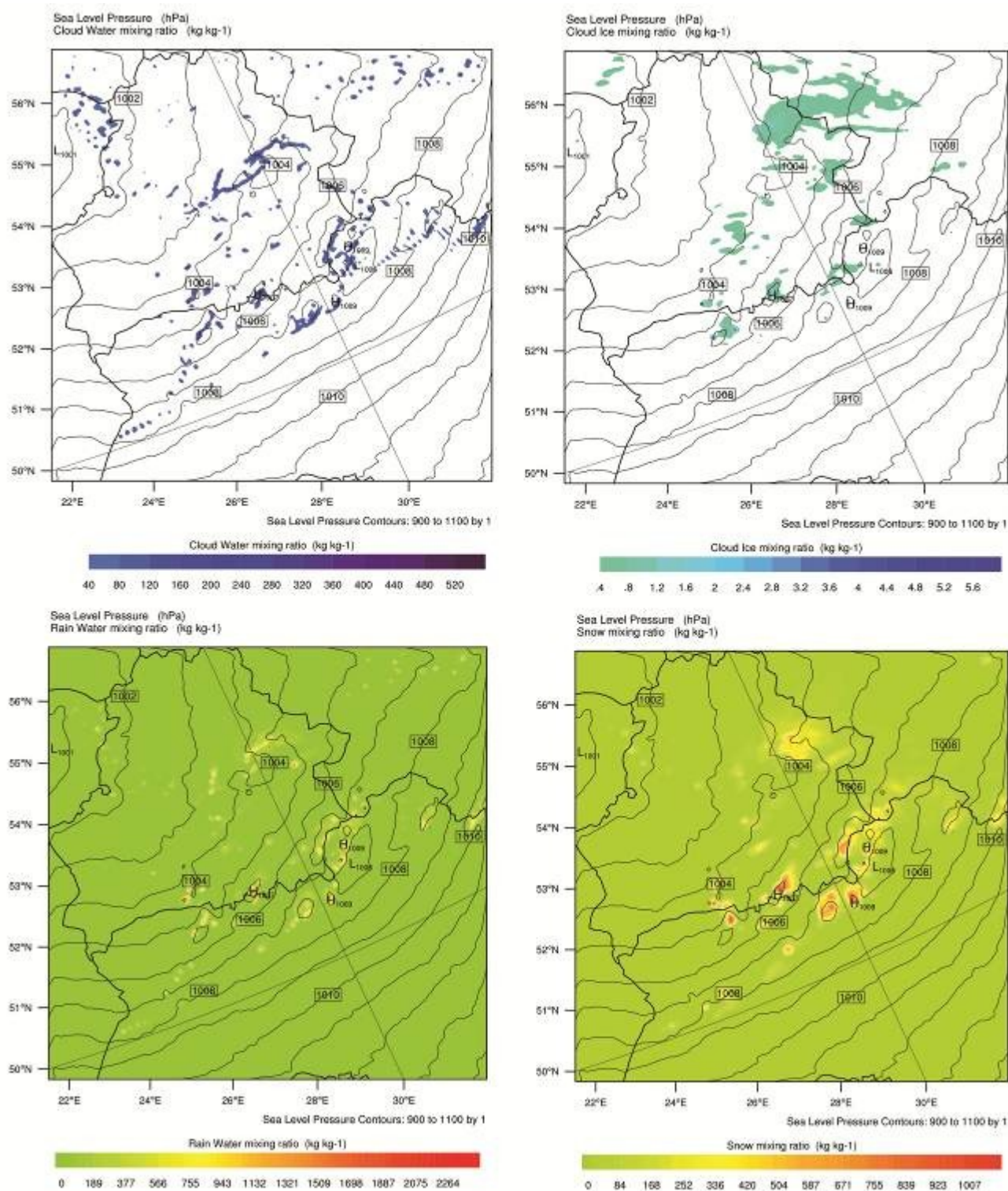
паказаў наяўнасці воблакаў над метэастанцыяй увагуле – па іх магчыма зрабіць пэўныя высновы. Па атрыманым картам і разрэзам гэта добра бачна. Самі разрэзы і большасці картаў (радыёрэха, тэмпература на ўзроўні 1000 гПа і вецер, вертыкальныя хуткасці) з-за іх аб'ёмнасці будучы прыведзены ў Дадатку (Мал. 1 – 17). Зараз жа будучы прадстаўлены карты паказчыкаў суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега, якія паказваюць наяўнасць і магутнасць воблакаў.



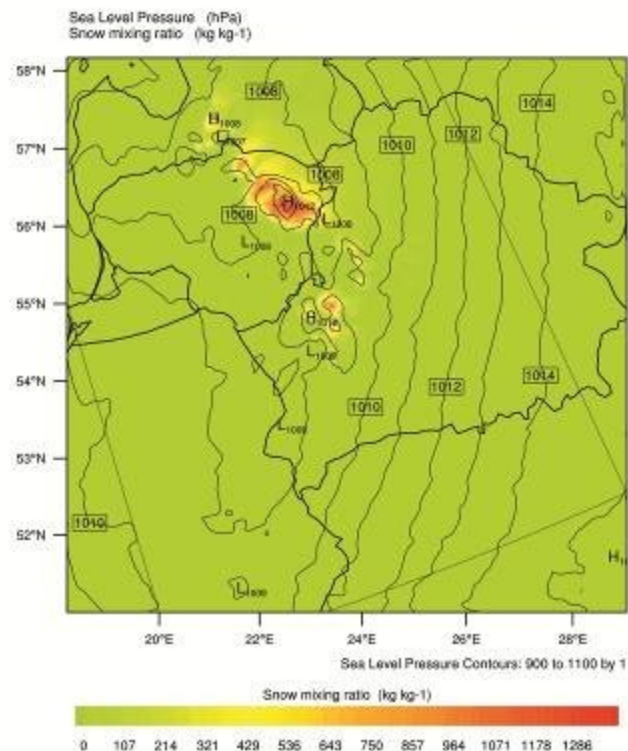
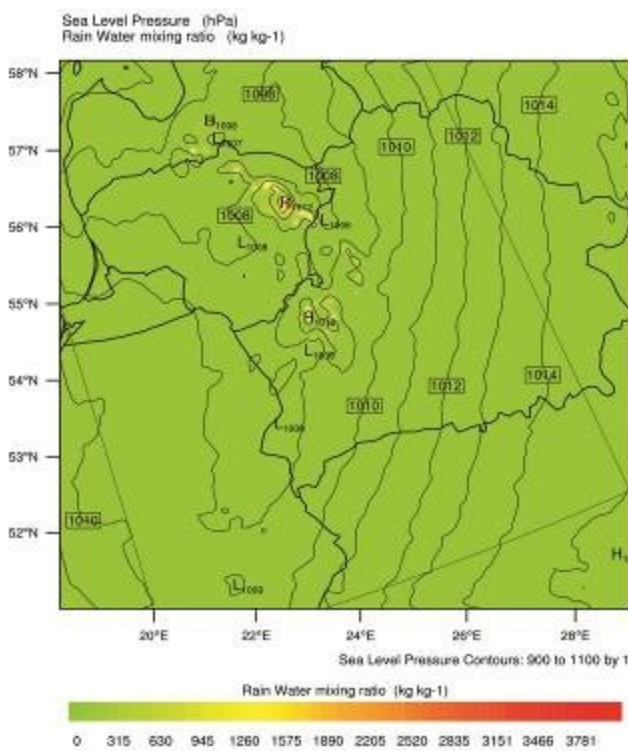
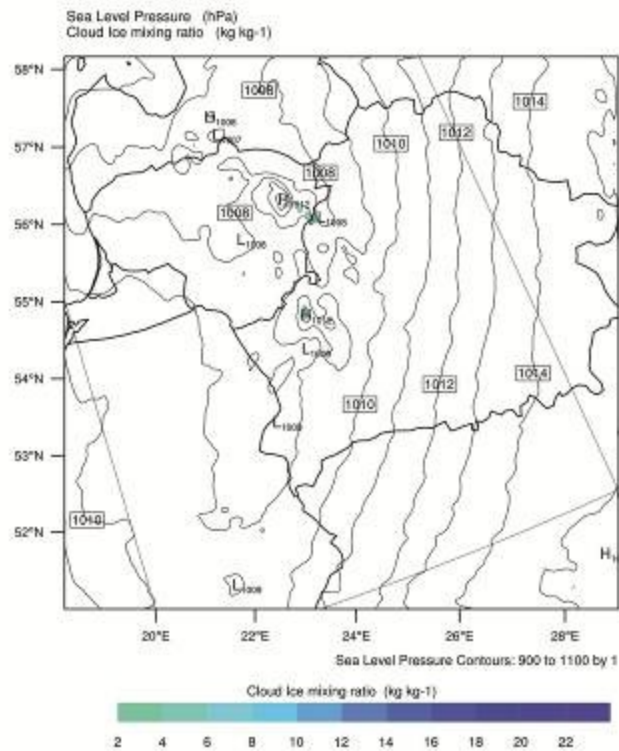
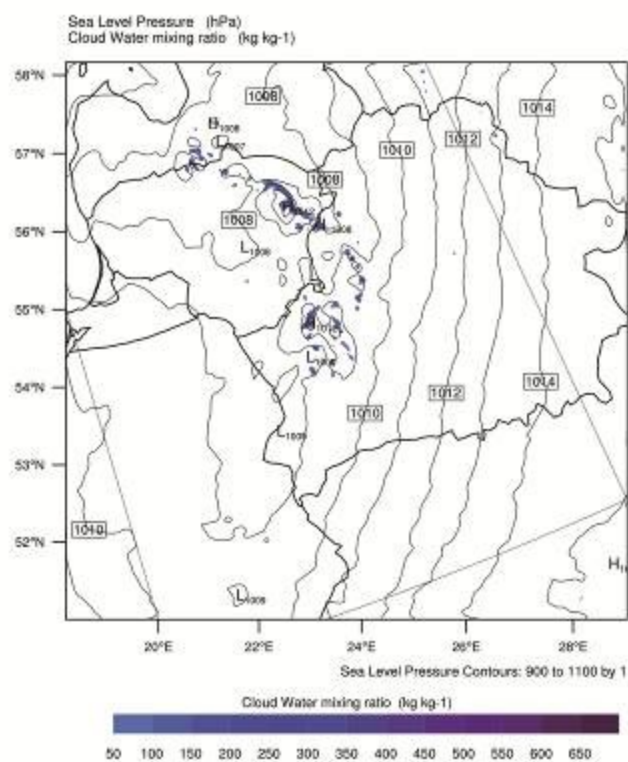
Мал. 3.5.1. Значэнні суадносін сумесяў для выпадка навалыніцы ў Пінску



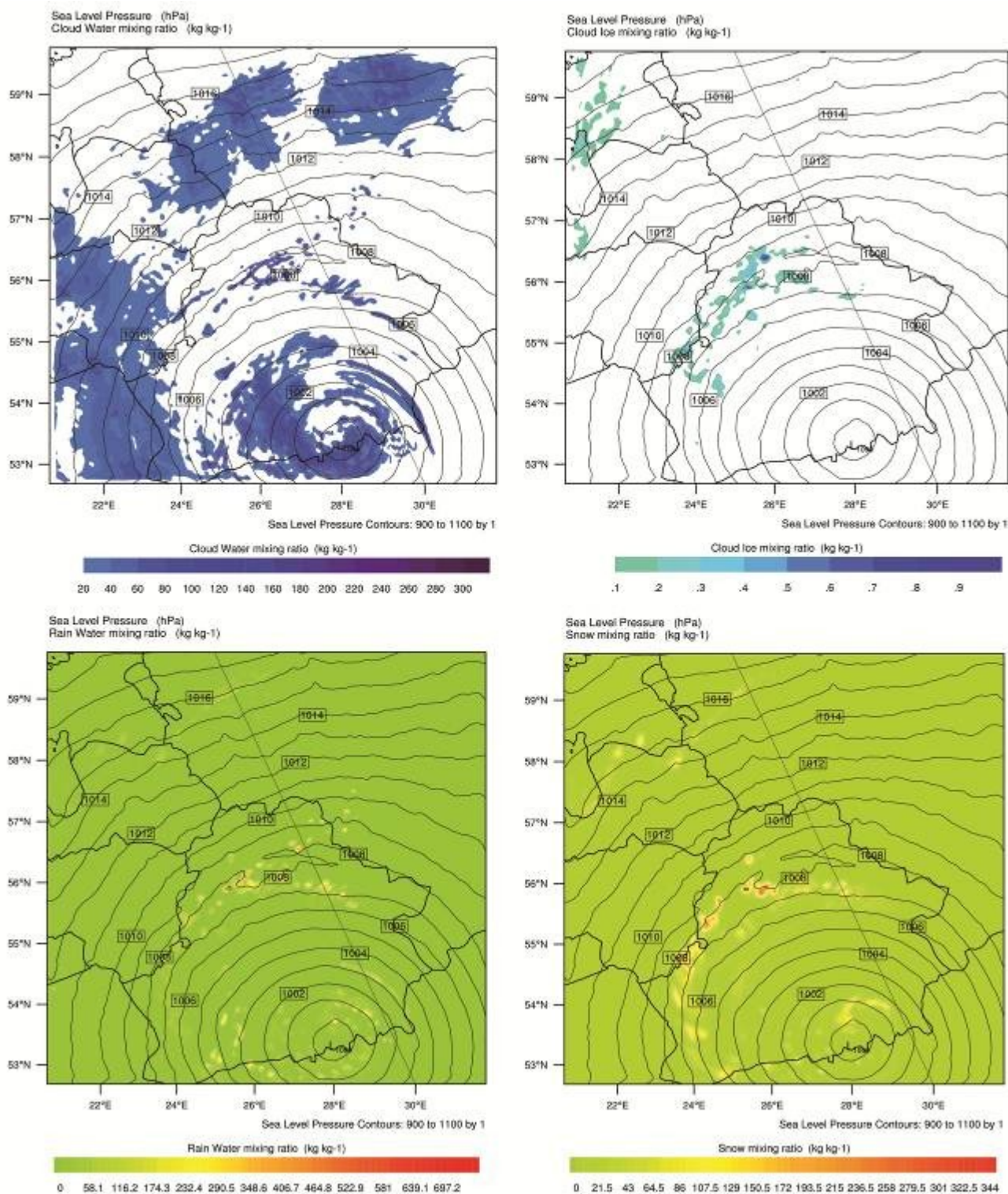
Мал 3.5.2. Значенні суадносін сумесяў для выпадку навальніцы ў Клічаве



Мал. 3.5.3. Значенні суадносін сумесяў для выпадку навалыніцы ў Мазыры



Мал. 3.5.4. Значенні суадносін сумесяў для выпадку навальніцы ў Навагрудку



Мал. 3.5.5. Значенні суадносін сумесяў для выпадку навальніцы ў Лепелі

Яны паказваюць наяўнасць магутных канвекцыйных звёнаў вышынёю ў 9-11,5 км і шырынёю да 5-6,5 км – выбіваецца толькі выпадак назірання ў Пінску, дзе, згодна разліку WRF, вочкі дасягалі 2-3 км у вышыню і да 3,5-5 км у дыяметры (верагодная прычына гэтага складаецца ў недастатковай дасканаласці схемаў-апісанняў працэсаў, што адбываюцца ў антыцыклонах, у

асаблівасці пры высокіх хуткасцях ветра). Такія значныя памеры абумоўлены ў першую чаргу пераважна фронтальным генэзісам разглядаемых навальніц. Згодна папарэднім даследаванням [71,79] адрозненні паміж фронтальнымі канвекцыйнымі з’явамі і ўнутрымасавымі складаюцца толькі ў памерах і працягласці існавання – з-за прымусовай кампаненты пад’ёму, што заўсёды мае месца быць на атмасферных франтах. Улічваючы гэта і, параўнаўшы вынікі разлікаў паміж сабой (і, у мэтах дакладнасці, са зветкамі вымярэнняў на ШСЗ), магчыма адзначыць выразныя рысы падабенства. Так, на разрэзах для ўсіх выпадкаў адзначаюцца выгнутыя ці стромка нахіленыя лініі токаў, якія і выяўляюць канвекцыйныя вочкі, і нязначныя адхіленні ва ўзроўнях ізатэрмаў (у сярэднім 50-150 м, максімум – 250-300 м на магутных франтах). Суадносіны сумесяў часцінак вільгаці – паказчык іх колькасці – для ўсіх выпадкаў маюць адрозныя значэнні як велічыні непасрэдна, так і вышыняў і аб’ёмаў распаўсюджвання. Так і павінна быць, бо для ўсіх выпадкаў адзначаліся розныя значэнні тэмпературы і адноснай вільготнасці: адпаведна +12°C і 65% у Клічаве, +21°C і 55% у Пінску, +23°C і 75% у Навагрудку, +15°C і 95% у Лепелі, +19°C і 90% у Мазыры. На большасці разрэзаў адзначаюцца вялікія вобласці неаднародных рухаў, маштабных парушэнняў трапасферных плыняў, якія дасягаюць да 11,5-12,5 км у вышыню і да 100-150 км у шырыню. Гэта ўласна фронтальныя вобласці. Характар плыняў там хаатычны, і кожны выпадак мае значныя адрозненні ад іншага. Але паколькі адзінай прычынай падобнага з’яўляецца моцная турбулентнасць, а яе наяўнасць – надменная ўласцівасць усіх атмасферных франтоў, то гэтая акалічнасць будзе не адрозненнем, а дадатковай прыкметай падабенства.

Такім чынам атрымліваецца, што ў рэгіёнах Беларусі з выразна адрознымі умовамі падсцілаючай паверхні пры праходжанні навальніц структура канвекцыйных вочак адзначалася падобнай. Таму магчыма ўпэўнена сказаць, што для такой тэрыторыі, як Рэспубліка Беларусь, нягледзячы на значную плошчу, характар паверхні даволі аднастайны і значнага ўплыву на структуру і развіццё канвекцыйных вочак не аказвае, таму пры правядзені лічбавых разлікаў ім можна знядбаць (ці не надаваць яму вялікай увагі).

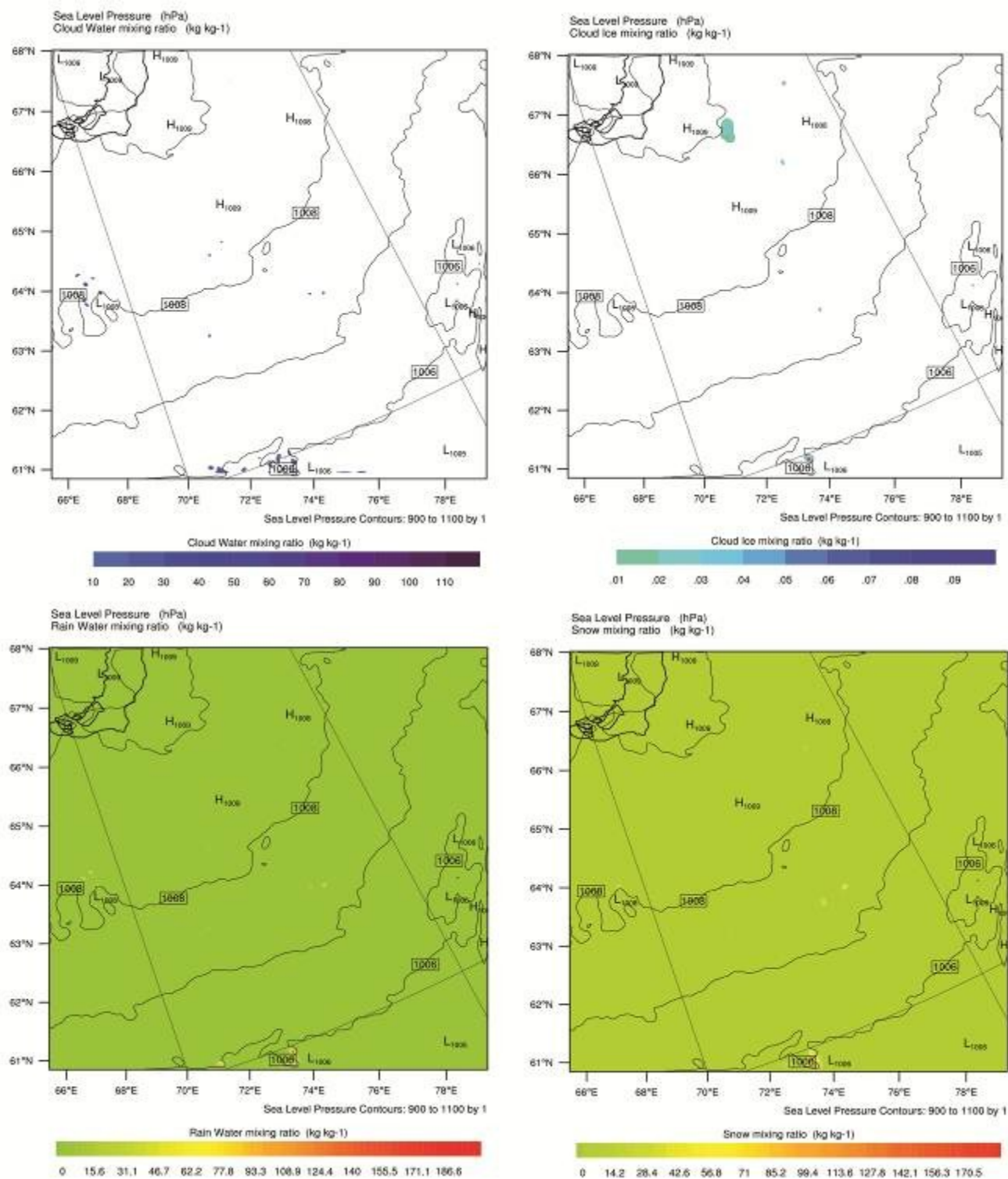
3.6. ЗАЛЕЖНАСЦЬ СТРУКТУРЫ КАНВЕКЦЫЙНЫХ ВОЧКАЎ АД КЛІМАТЫЧНЫХ УМОЎ

Канвекцыйныя воблакі і навальніцы – абсалютна інтразанальныя і інтрасезонныя з’явы. Пры наяўнасці спрыяльных умоў яны могуць узнікаць як на Таймыры, так і на Антыльскіх астравах, як у Новай Гвінеі, так і ў Грэнландыі. Хаця абсалютная большасць выпадкаў навальніц рэгіструецца ў цёплы перыяд года, але, напрыклад, у Беларусі раз у 4-7 гадоў – у залежнасці ад станцыі – адзначаецца зімовая навальніца – канвекцыйныя жа воблакі фіксуюцца кожную зіму па некалькі разоў.

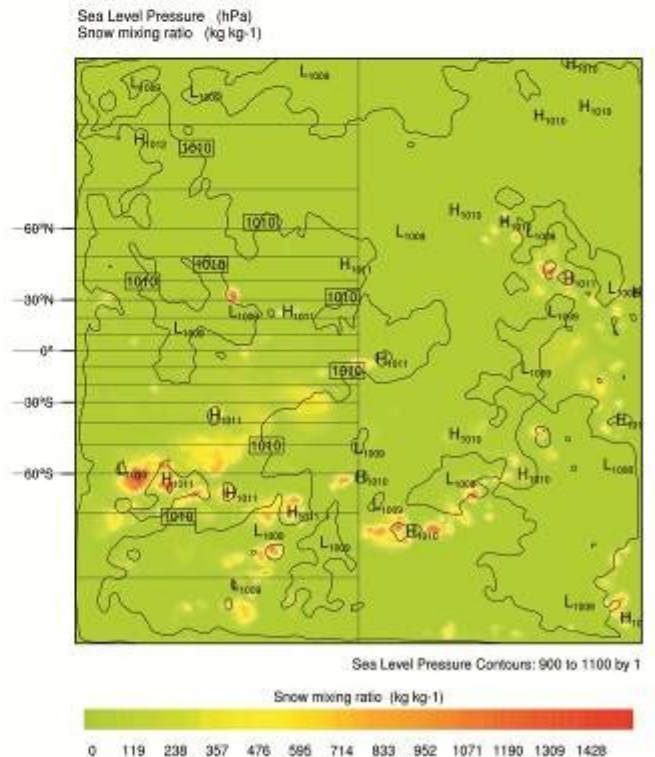
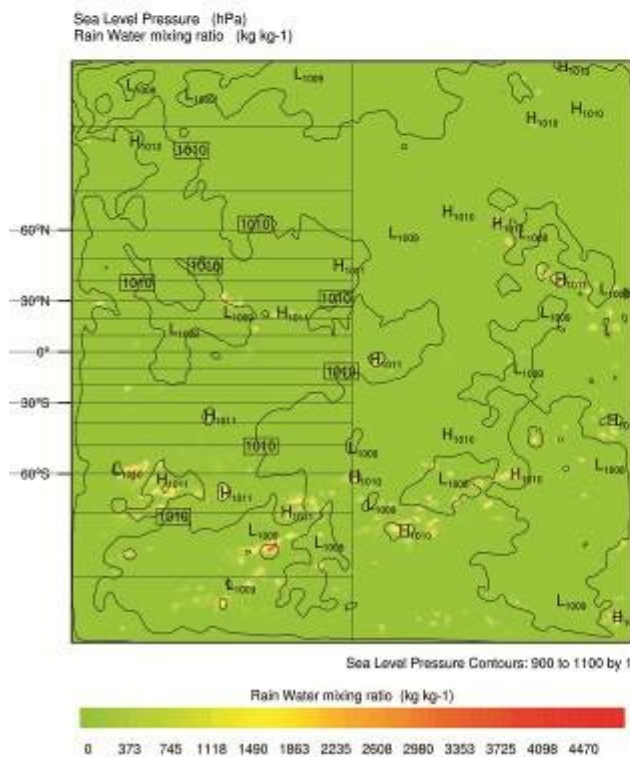
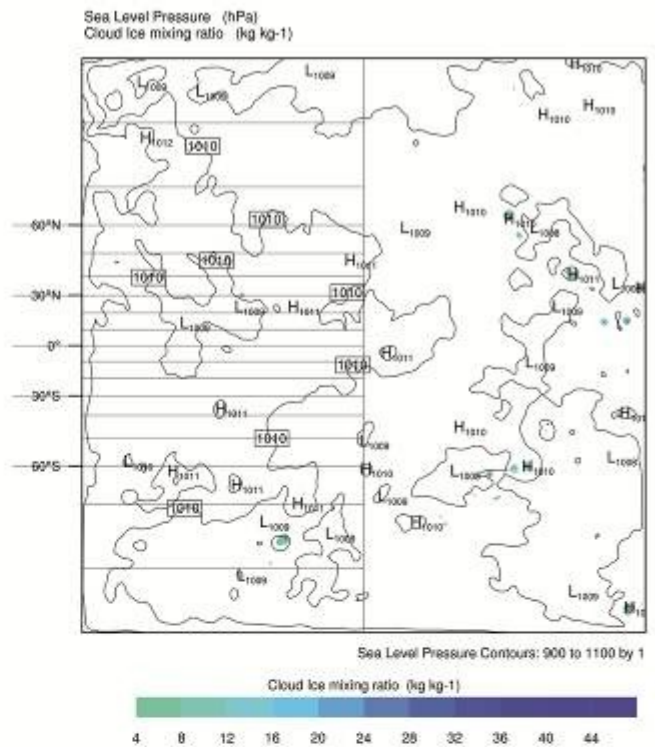
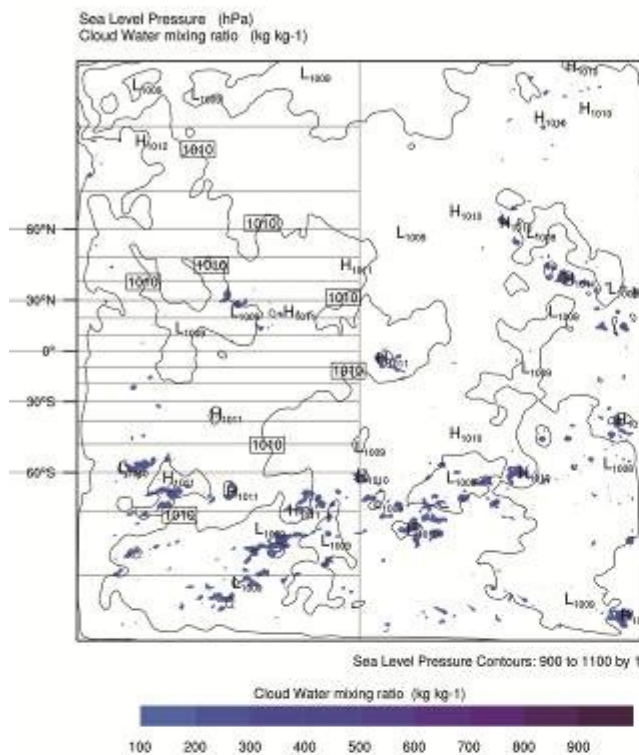
Гэтая акалічнасць прымушвае спытаць: калі воблакі вертыкальнага развіцця ўзнікаюць амаль што па ўсёй планеце, ёсць ці адрозненні паміж імі, і калі так, то якія? Для рашэння дадзенай задачы былі ўзяты выпадкі навальніц на метэастанцыях Наябрск і Бангі, падобных па араграфічных умовах, але абсалютна адрозных па кліматычных (мяжа кантынентальных умеранага і субарктычнага паясоў, сярэдзіна экватарыяльнага пояса адпаведна), для параўнання ў кантрольных мэтах быў узяты выпадак навальніцы ў Навагрудку з папярэдняга задання.

Правёўшы аналіз і параўнанне візуалізаваных вынікаў лічбавага разліку, высветлілася, што ключавым адрозненнем паміж канвекцыйнымі вочкамі ў кліматычных паясах стала колькасць энергіі, якая ідзе на іх падтрымліванне (у экватарыяльным поясе назіраюцца большыя тэмпературы і вільготнасць, чым ва ўмераным) – з гэтага, у сваю чаргу, выцякае розніца ў памерах (вочкі, што назіраліся ў Бангі, былі ў паўтара разы вышэйшыя і шырэйшыя за вочкі ў Наябрску і Навагрудку: 15 км і 10,5-11,5 км і 8,5 км і 5-6,5 км адпаведна; таксама на гэта ўплывае вышыня трапапаўзы) і часе існавання звёнаў (як для фронтальных, так і для ўнутрымасавых вочкаў). Але больш адрозненняў, фактычна, няма: характар змянення ізатэрмаў, накірункі і скрыўленні ліній току ветра для ўсіх трох выпадкаў падобны, як у папярэднім заданні – параўнанне вертыкальных разрэзаў для Бангі і Наябрска добра выяўляе гэтыя асаблівасці, бо ў абодвух выпадках назіраліся ўнутрымасавыя навальніцы, не скажонныя фронтальным уплывам (але і разрэзы для Навагрудка паказваюць шмат агульнага). Для разглядаемых выпадкаў назіраюцца каласальныя адрозненні ў велічынях суадносін сумесяў фаз часцінак вільгаці – аж да 3-8 разоў – але так і мае быць з-за розніц ў абсалютнай вільготнасці паветра ў розных кліматычных паясах (важнай прыкметай гэтага магчыма лічыць колькасць ападкаў – так, для Навагрудка і Наябрска яна не перавышае 25 і 7 мм за суткі адпаведна, а ля Бангі сярэдня колькасць складае 25-40 мм за суткі, а ў цэлым шэрагу мясцінаў яна перавысіла 100 мм).

Па аналогіі з папярэднім заданнем, з-за сваёй аб’ёмнасці вертыкальныя разрэзы і карты тэмпературы на ўзроўні 1000 гПа і прыземнага ветра, радыёрэха і вертыкальных хуткасцяў будуць размешчаны ў Дадатку (Мал. 18 – 25) – зараз жа будуць прыведзены карты размеркавання і колькасці фазаў вільгаці.



Мал. 3.6.1. Значенні суадносін сумесяў для выпадку навалыніцы ў Наябрску



Мал. 3.6.2. Значенні суадносін сумесяў для выпадку навалніцы ў Бангі

Такім чынам магчыма зрабіць выснову аб тым, што для тэрыторый з падобным рэльефам асаблівасці клімату не аказваюць ніякага ўплыву на структуру канвекцыйных вочак, а толькі змяняюць іх памеры і час існавання.

3.7. КРЫТЭРЫ ПАСПАЗНАВАННЯ НАВАЛЬНІЧНЫХ ВОБЛАКАЎ

Самі канвекцыйныя воблакі як з'ява ўяўляюць пагрозу толькі для паветранага транспару – з-за моцных турбулентных плыняў, што ў іх развіваюцца – для астатніх галін гаспадаркі яны нястрашныя. Але навальніцы, што ўзнікаюць у некаторых воблаках, здольны нанесці шкоду ў многіх сферах гаспадарчай дзейнасці. Таму вельмі актуальным становіцца праблема выяўлення навальнічных воблакаў сярод астатніх канвекцыйных.

Найбольш надзейная прыкмета – гэта наяўнасць электрычных працэсаў. Але ва ўсіх сучасных лічбавых мадэлях блок, адказны за падобныя разлікі, адсутнічае ці толькі распрацоўваецца. З-за гэтага выяўляць навальнічныя воблакі прыходзіцца выключна па ўскосных прыкметах.

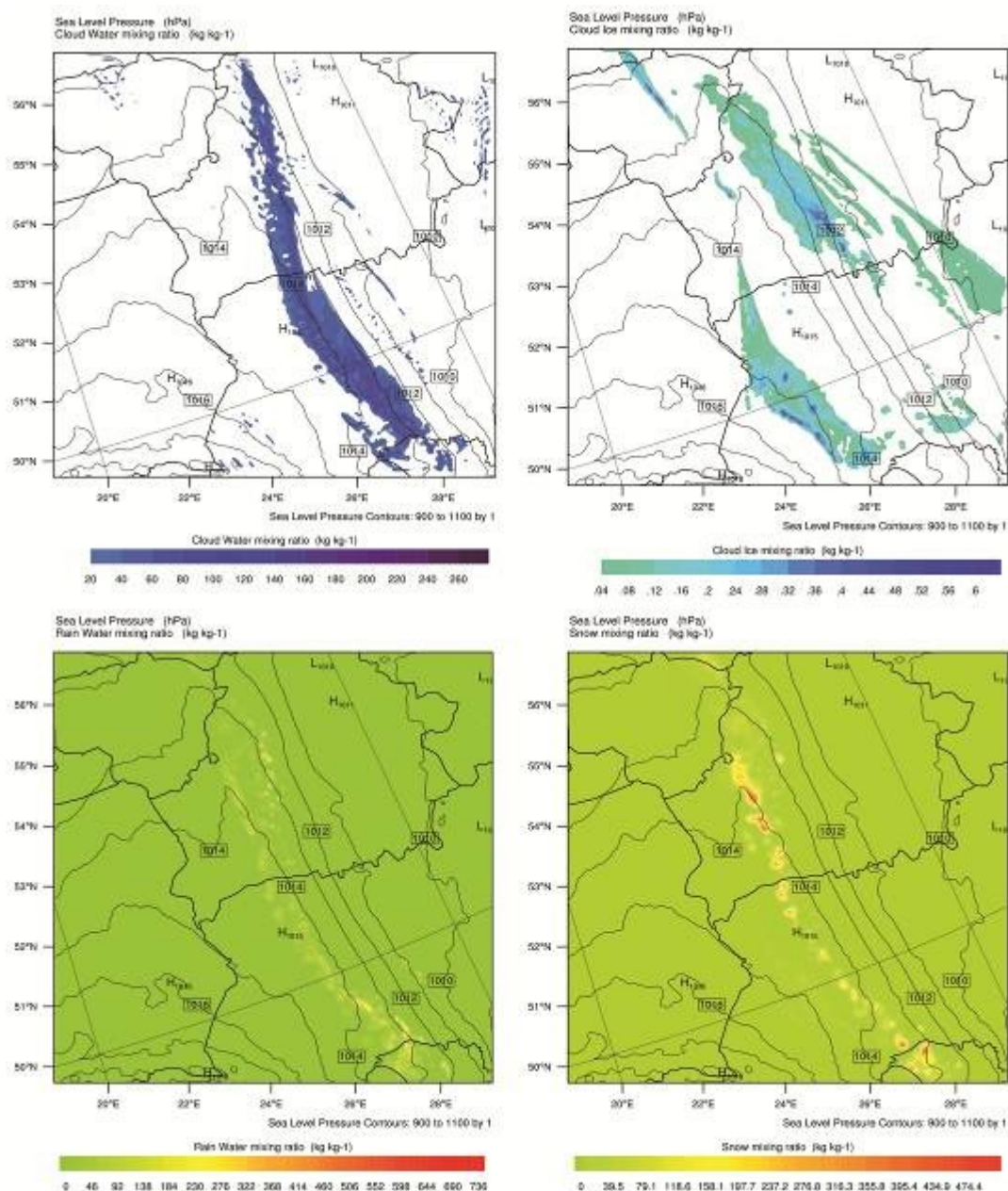
У першую чаргу гэта паказчыкі радыёлакацыйнай адбівальнасці і ўласныя радыёсігналы воблакаў. Так, выкарыстоўваючы высокаадчувальныя радары, накіраваныя на прыём сігналаў, па даўжынях хваляў пакетаў імпульсаў магчыма высветліць не тое што наяўнасць маланак (сам факт моцных радыёсігналаў сведчыць аб пачатку электрычных працэсаў), а нават магутнасць разрадаў. Гэты спосаб дае добрыя вынікі, таму набывае ўсё большае распаўсюджванне ў свеце. Яшчэ больш зручным яго робіць тое, што ўжо маюцца распрацоўкі разліковых блокаў радыёлакацыйных паказчыкаў з шырокім спектрам параметраў. Але дадзены спосаб патрабуе стварэння шырокай сеткі метэаралагічных радыёлакатараў, а з-за кошту падобнага мерапрыемства шэраг краін проста не могуць сабе гэтага дазволіць. Таму акрамя радыёлакацыйных звестак выкарыстоўваюцца і іншыя ўскосныя паказчыкі, якія магчыма разлічваць у большасці мезамасштабных мадэляў. Да іх адносяцца:

- Колькасці часцінак розных фізічных фаз вільгаці, але, у першую чаргу, ледзяной;
- Аб'ёмы і вышыні, якія займаюць вобласці распаўсюджвання часцінак;
- Дыяметры і вышыні канвекцыйных вочкаў;
- Тэмпературы паветра на вышынях абласцей распаўсюджвання часцінак вільгаці;
- Вертыкальныя хуткасці ветру ў воблаках.

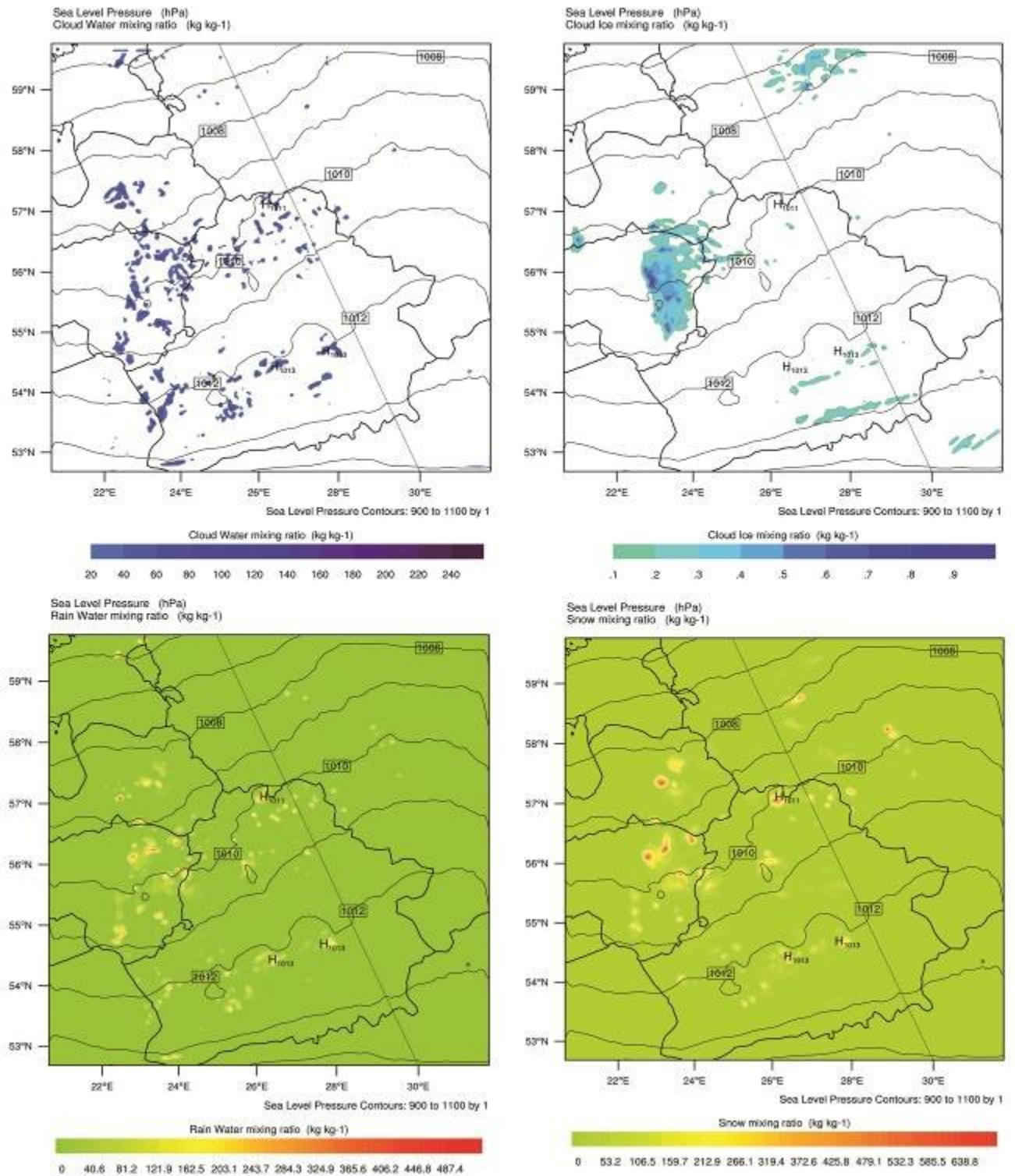
Першыя два параметры характарызуюць непасрэдна носьбіты зараду, а апошнія тры – моц сілы трэння, што прыводзіць да электрызацыі.

Схема і ўмовы правядзення лічбавага разліку былі падрабязна апісаны ў папярэднім раздзеле. Але перад тым, як прыступіць да аналізу вынікаў, неабходна даць характарыстыку метэаралагічнай карціны, што назіралася падчас выпадку зімовай навальніцы, а таксама выпадках праходжання кучавадажджавых воблакаў без навальніц. Так, для навальніцы ў Мінску зімою 2008 года адзначаюцца вочкі вышынёю 7,5-8 км і дыяметрам да 7-8,5 км, але пры гэтым воблакі (якія ўяўлялі сабой грады, што засталіся пасля праходжання фронту) распаўсюджваюцца не на ўсю вышыню, а толькі да 4-4,5 км. Для

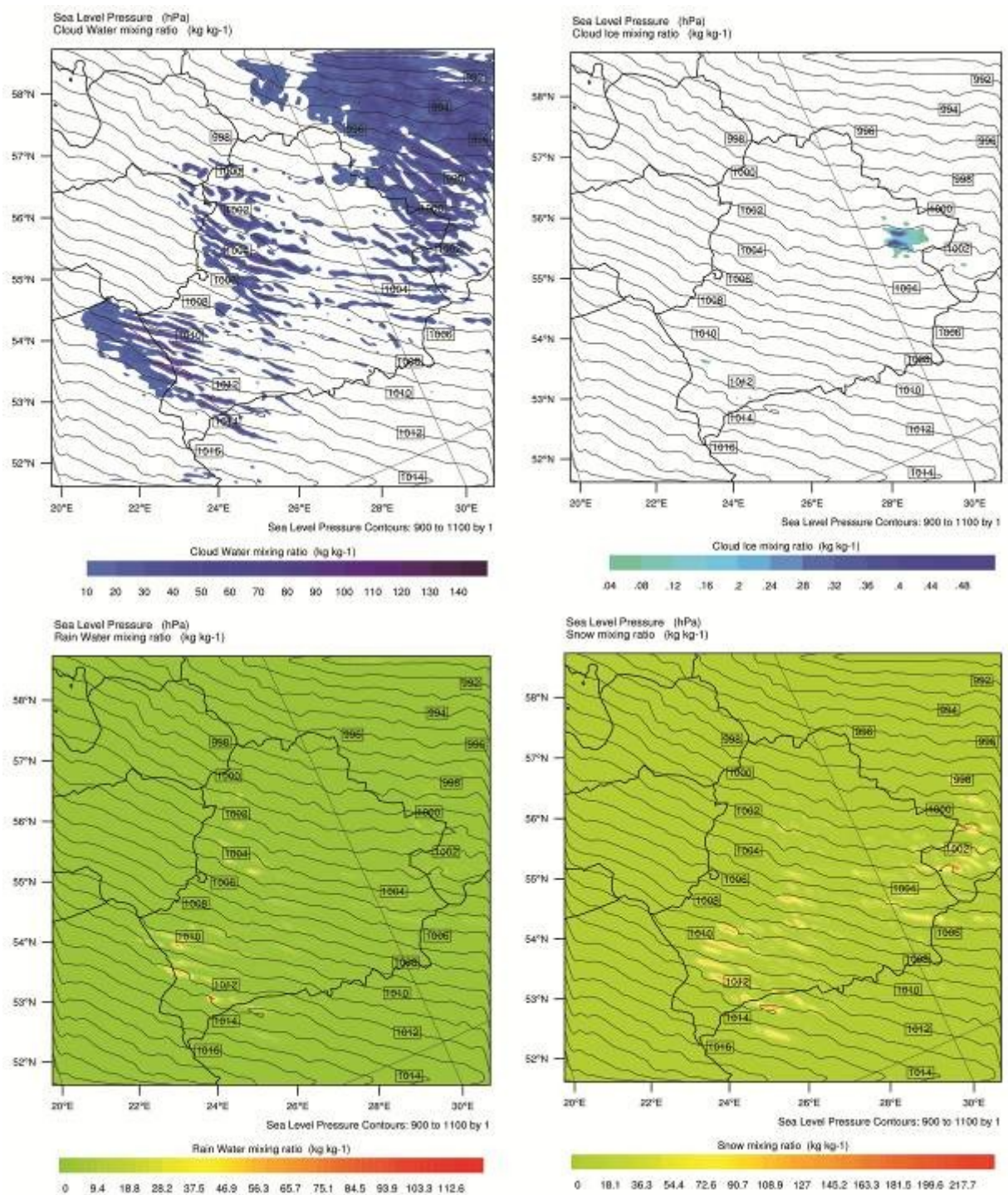
выпадкаў летніх кучава-дажджавых воблакаў без навальніц адзначаюцца вочкі 8-9 км вышынёй і 7-8,5 км у дыяметры для Лепеля і 9-10,5 км вышынёй і 5,5-7 км у дыяметры для Пінска, воблакі ў іх займаюць болей за $\frac{3}{4}$ аб'ёму злёнаў, але выпадак для Лепеля – гэта ўнутрымасавая воблачнасць, а для Пінска – моцны фронт. Ва ўсіх разглядаемых выпадкаў у воблаках адзначаецца прысутнасць усіх чатырох фазаў, але ў рознай колькасці (так, для зімовай навальніцы колькасць дажджавых кропель і снегу у 2-3 разы меншая за летнія выпадкі). Зараз, па аналогіі з папярэднімі заданнямі, будуць прыведзены карты размеркавання і колькасці велічыняў суадносін сумесяў для разгледжаных выпадкаў – астатнія карты і вертыкальныя разрэзы хмешчаны ў Дадатку (Мал. 26 – 35).



Мал. 3.7.1. Значэнні суадносін сумесяў для выпадку праходжання кучава-дажджавых воблакаў у Пінску

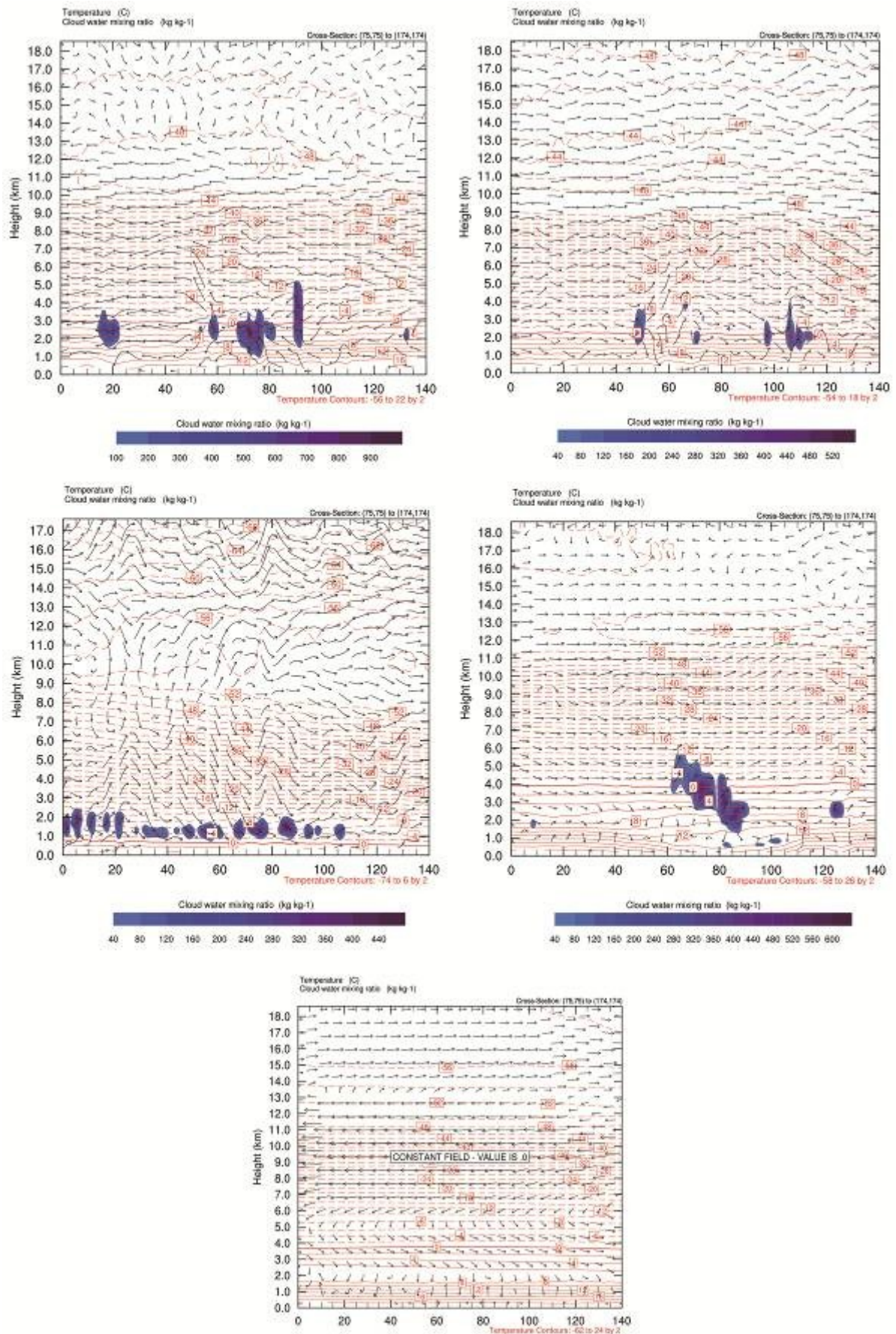


Мал. 3.7.2. Значенні суадносін сумесяў для выпадку праходжання кучавадажджавых воблакаў у Лепелі

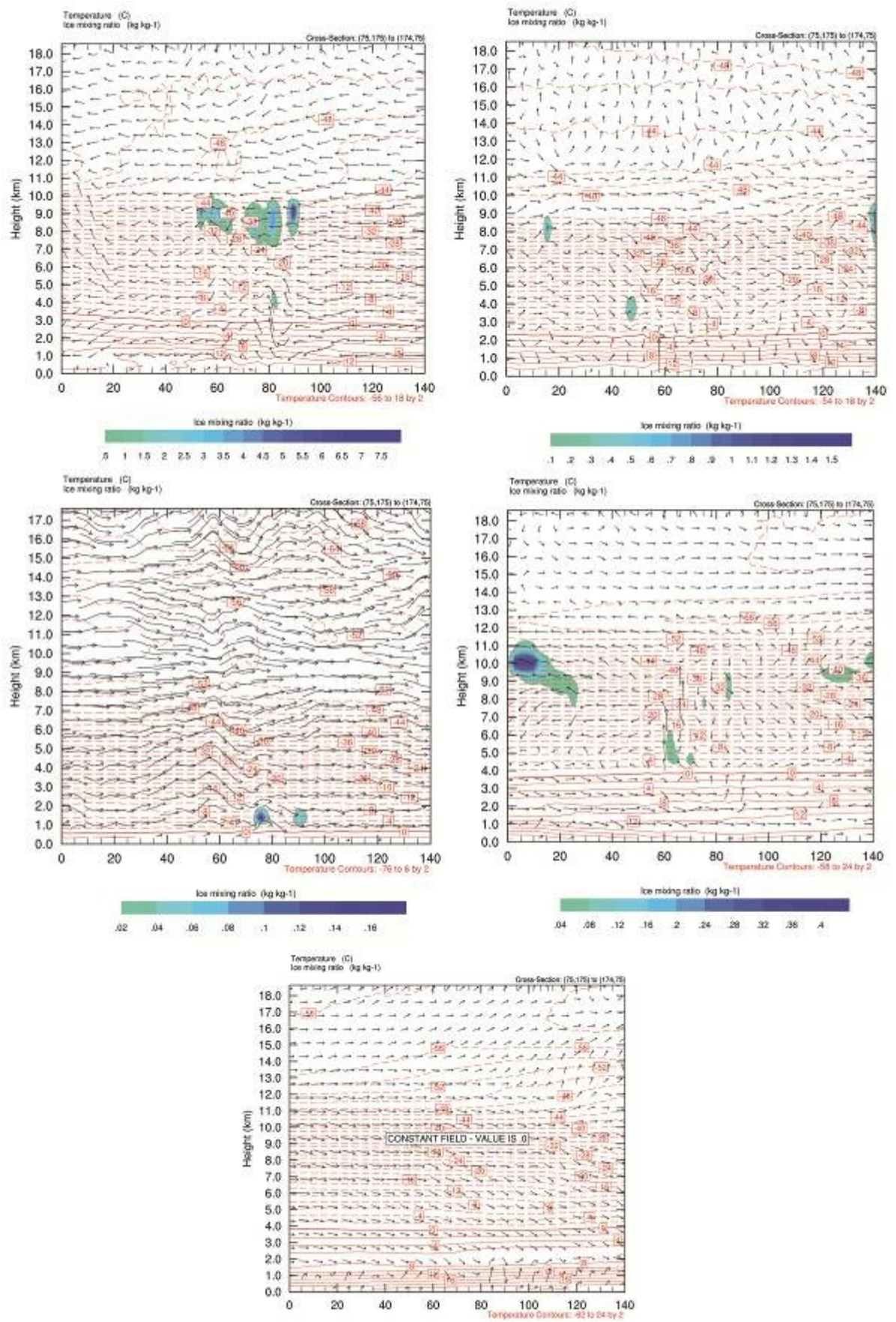


Мал. 3.7.3. Значэнні суадносін сумесяў для выпадку навалыніцы ў Мінску

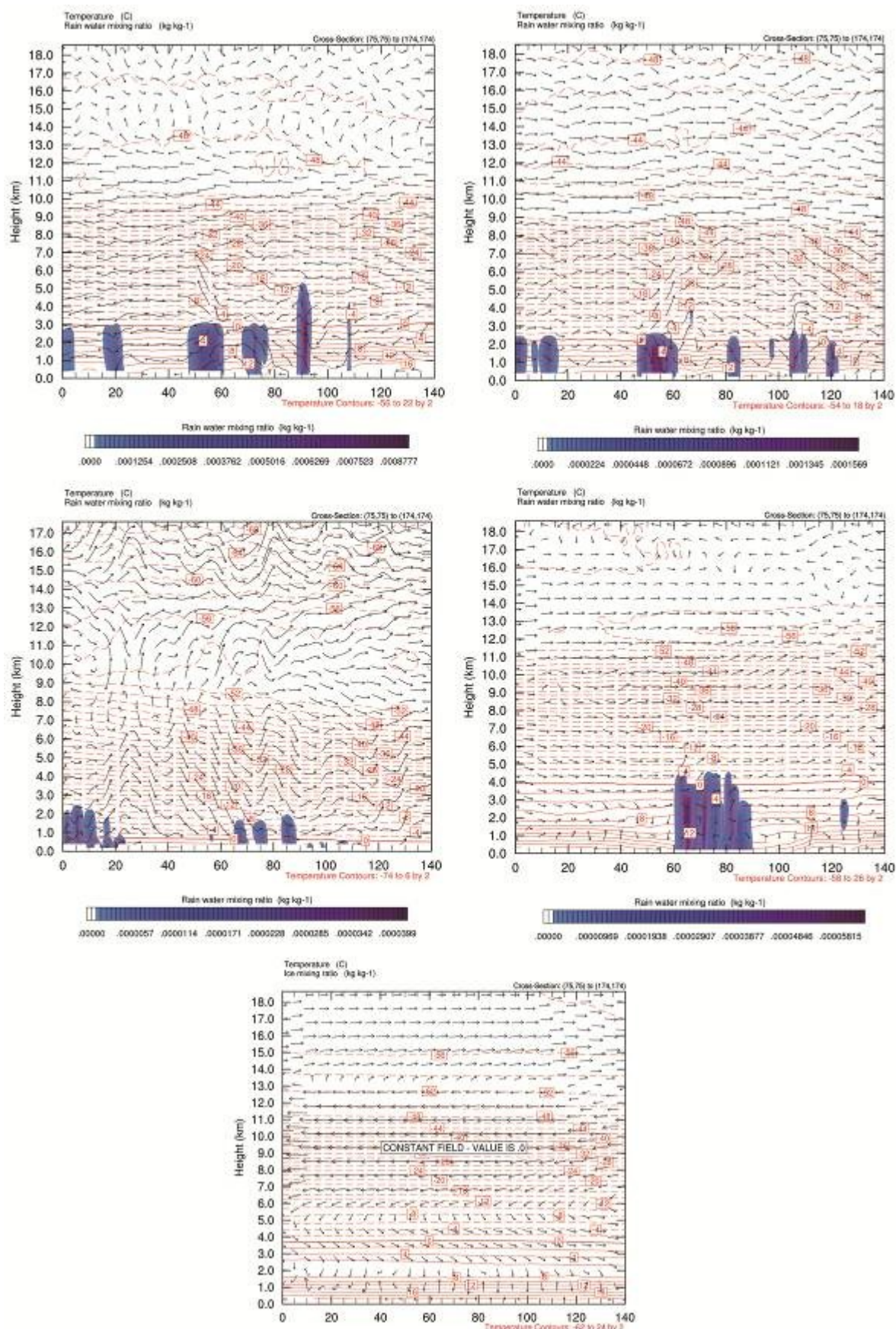
Але з дапамогай гэтых картаў выявіць усе асаблівасці немагчыма. Таму зараз будуць прыведзены вертыкальныя разрэзы, зробленыя праз цэнтральныя ўчасткі разліковых даменаў (вадкая фаза і дажджавыя кропі – з паўднёвага захаду на паўночны ўсход, ледзяная фаза і снег – з паўночнага захаду на паўднёвы ўсход). Парадак размяшчэння картаў на малюнках – навалыніца ў Лепелі летам, праходжанне кучава-дажджавога воблака без навалыніцы там жа, навалыніца ў Мінску зімой, праходжанне кучава-дажджавых воблакаў над Пінскам, навалыніца там жа летам (злева направа і зверху ўніз).



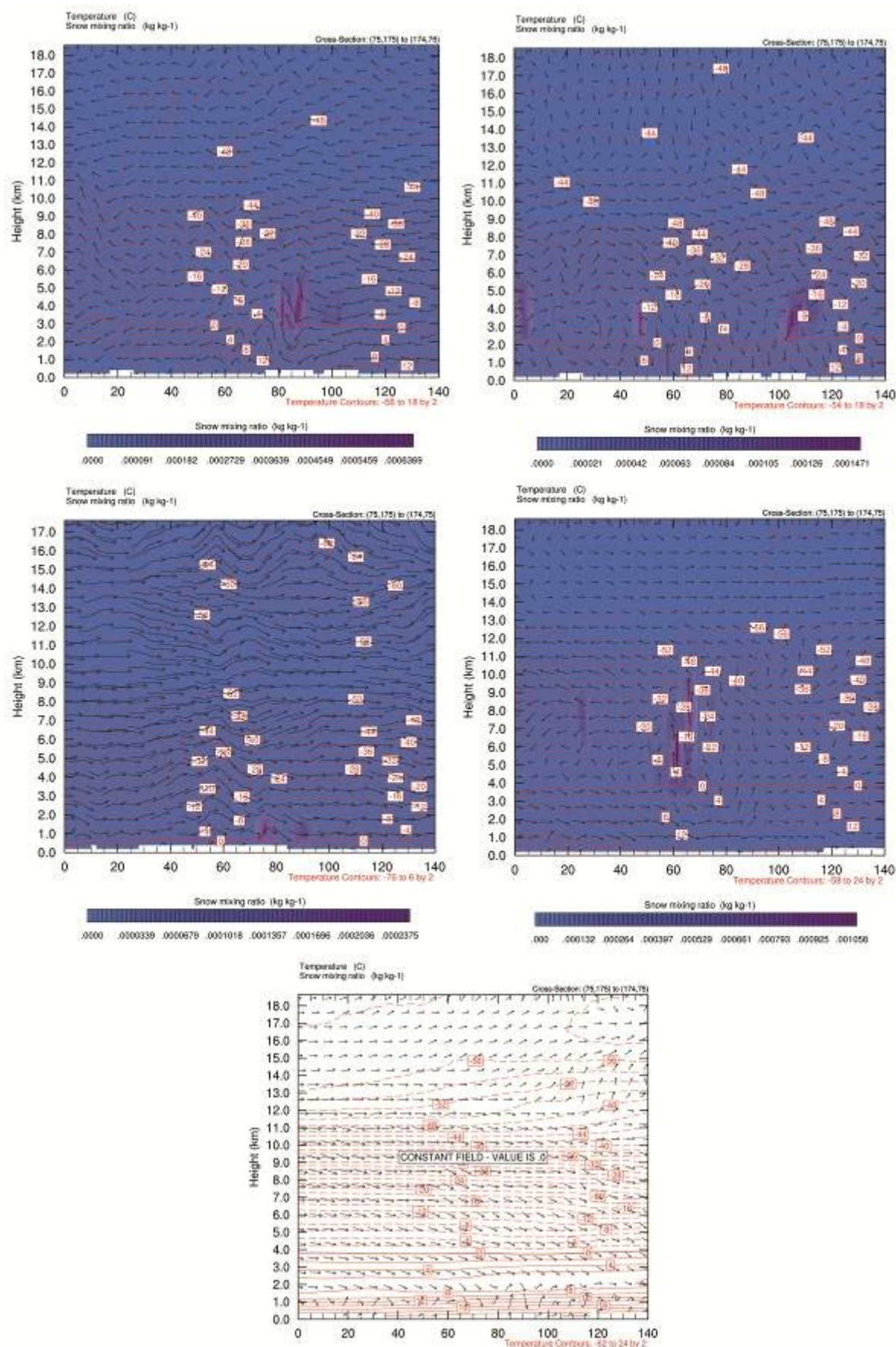
Мал. 3.7.4. Размеркаванне вадкай фазы па вертыкалі для разглядаемых выпадкаў



Мал. 3.7.5. Размеркавание ледяной фазы па вертыкалі для разглядаемых выпадкаў



Мал. 3.7.6. Размеркаванне фазы дажджавых кропель па вертыкалі для разглядаемых выпадкаў



Мал. 3.7.7. Размеркаване фази снега па вертыкалі для разглядаемых выпадкаў

За выключэннем выпадка 23 ліпеня 2012 года для Пінска, калі лічбавы разлік не паказаў наяўнасці не тое што навальніцы, а воблакаў увогуле (што, напэўна, звязана як з недахопамі мадэлі, так і якасцю назіранняў), па атрыманым дадзеным магчыма зрабіць пэўныя высновы. Так, для выпадкаў магчыма адзначыць значны шэраг агульных рыс: наяўнасць часцінак усіх чатырох фазаў вільгаці ў воблаках, падобныя ўзроўні размеркавання – ніжэй узроўня замярзання для дажджавых кропель, ля ўзроўня для вадкай фазы, пад трапапаўзай для ледзяной фазы і паміж узроўнем замярзання і трапапаўзай для снега (выключэнне складае выпадак зімовай навальніцы ў Мінску, калі вобласці размеркавання снегу, вадкай і ледзяной фаз амаль што супадалі), ва ўсіх канвекцыйных звёнах хуткасці вышэйшыя, чым у сярэднім па разрэзе, даволі падобныя памеры вочкаў і іх сярэднія тэмпературы, блізкія значэнні сярэдніх тэмператураў у абласцях распаўсюджвання часцінак розных фазаў (пры гэтым адзначалася, што ў абласцях распаўсюджвання цвёрдых часцінак для выпадка праходжання кучава-дажджавога воблака над Пінскам 31 ліпеня 2013-га тэмпературы былі ніжэйшыя, чым для выпадкаў навальніц – як летняй, так і зімовай).

Згодна гэтым высновам, мінімум два з адзначаных раней крытэрыяў не даюць добрых вынікаў пры дэнтыфікацыі воблакаў, а астатнія – могуць быць выкарыстаны няпоўнасю. Таму быў праведзены яшчэ больш старанны аналіз, і ён выявіў наступныя пункты (параметры), якія могуць быць выкарыстаны для выяўлення і прагназавання навальнічных воблакаў:

- Хуткасці вятроў, у асаблівасці вертыкальных. Хаця для ўсіх выпадкаў адзначалася перавышэнне хуткасці паветраных плыняў унутры звяна у 1,1-1,4 разы за сярэдняю па разрэзе, але у навальнічных воблаках хуткасці вятроў у абласцях распаўсюджвання цвёрдых часцінак былі вышэйшыя за значэнні для абласцей распаўсюджвання вадкіх часцінак хаця б на 10-15% і складалі ў сярэднім 1,25-1,55 ад сярэдняй па разрэзе. Такія ж высокія значэнні адзначаліся для выпадку праходжання кучава-дажджавога воблака над Пінскам 31 ліпеня 2013 года, але там яны фіксаваліся на ўсім працягу вочкі.
- Вышыні і аб'ёмы, якія займаюць розныя фазы вільгаці. Самі велічыні не маюць вялікай значнасці, бо яны могуць быць аднолькавымі для выпадкаў *Cumulonimbus* як з навальніцай, так і без яе, і быць вельмі адрознымі для выпадкаў двух навальніц падобнай магутнасці. Як высветлілася, значэнне мае наяўнасць абласцей, дзе вобласці распаўсюджвання ўсіх чатырох фазаў (ці трох з ніх – выключаючы дажджавыя кроплі) перакрываюць адна адну – інакш кажучы, вобласці, дзе адначасова адзначаецца наяўнасць усіх фазаў вільгаці. Чым яны болей, тым вышэй верагоднасць развіцця навальніцы. Менавіта гэтым растлумачваецца развіццё навальніцы ў лютым 2008 года над Мінскам – там “вобласці кантакту” былі найбольшыя, пераўзыходзячы выпадкі праходжання кучава-дажджавых воблакаў і набліжаючыся да выпадкаў летніх навальніц па памерах.

Верагодна, гэта звязана з уплывам на трэнне і сутыкненні паміж часцінкамі-носьбітамі.

- Колькасці часцінак розных фазаў. Па выніках аналізу візуалізаваных вінікаў лічбавага разліку атрымліваецца, што для выпадку зімовай навальніцы адзначаліся меншыя колькасці вільгаці, чым для ўсіх летніх выпадкаў назіранняў кучава-дажджавых воблакаў па-за залежнасці ад наяўнасці навальніцы: так, 23 лютага 2008-га над Мінскам фіксавалася ў 2-3,5 разы менш буйных часцінак вільгаці (дажджавых кропель і снегу), чым 31 ліпеня 2013-га над Пінскам і 17 ліпеня 2012-га над Лепелем, розніца ў колькасці ледзяной фазы дасягала болей за 10 разоў (але гэта растлумачваецца невысокай дакладнасцю выкарыстанай схемы параметрызацыі мікрафізікі (№8) для разліку колькасцей часцінак ледзяной фазы – для параўнання, схемы №7 і №9 даюць вынікі па значэннях у 25-30 і 20-25 разоў большыя адпаведна, і яны з'яўляюцца больш дакладнымі). Гэтыя асаблівасці нязручна выкарыстоўваць у практыцы, бо відавочных вінікаў яны не даюць. Як высветлілася, звяртаць увагу патрэбна на значэнне колькасці вадкай фазы (воблачных кропель). Для выпадку навальніцы ў Лепелі летам сярэдняе і максімальнае значэнні колькасці складаюць 500 кг/кг^{-1} і 850 кг/кг^{-1} , для навальніцы зімой у Мінску – 300 кг/кг^{-1} і 460 кг/кг^{-1} адпаведна, а для выпадку праходжання *Cumulonimbus* над Пінскам 31 ліпеня 2013 года, калі адзначаліся самыя вялікія воблакі з усіх разглядаемых выпадкаў, 380 кг/кг^{-1} і 620 кг/кг^{-1} адпаведна. Атрымліваецца, што падчас зімовай навальніцы колькасці былі меншымі ўсяго на 20-25% за моцныя кучава-дажджавыя летнія воблакі без навальніцы. З гэтага магчыма зрабіць выснову аб тым, што для развіцця навальніцы важная высокая колькасць вільгаці ў форме воблачных кропель, якую магчыма назваць “пачатковай вільгаццю”. Чым яна большая, тым больш часцінак іншых фазаў – у першую чаргу цвёрдых – з яе можа з'явіцца, і, такім чынам, вышэй верагоднасць развіцця навальніцы. Магчыма зрабіць меркаванне, што калі сярэднія і максімальныя значэнні пачатковай вільгаці перавышаюць 450 кг/кг^{-1} для лета, 250 кг/кг^{-1} для зімы і 700 кг/кг^{-1} для лета і 420 кг/кг^{-1} для зімы адпаведна, трэба чакаць навальніцу.

Іншыя крытэрыі таксама магчыма выкарыстоўваць, але вынікі не будуць хуткімі і дакладнымі.

РАЗДЗЕЛ 4. ЛІЧБАВЫ ПРАГНОЗ КАНВЕКЦЫЙНАЙ ВОБЛАЧНАСЦІ І НАВАЛЬНІЦ

4.1. ЛІЧБАВАЕ МАДЭЛЯВАННЕ НАДВОР'Я І КЛІМАТА

Лічбавае мадэляванне атмасферных працэсаў – аснова практычнай метэаралогіі на сённяшні дзень. З дапамогай мадэляў магчыма праводзіць апрацоўку, абагульненне, аналіз дадзеных для навуковых даследванняў і, галоўнае, ажыццяўляць прагноз.

Самі лічбавыя метады прагноза надвор'я – гэта колькасныя метады прагноза, заснаваныя на рашэнні раўнанняў гідратэрмадынамікі атмасферы – з зададзенымі межавымі ўмовамі. Гэтыя раўнанні звычайна прадстаўлены ў дыферэнцыяльным выглядзе і выводзяцца з законаў захавання (энергіі, імпульсу і масы), і формул асноўных дзейсных сілаў атмасферы (трэння, Карыяліса, градыента, цяжару і цэнтрабежнай – але з-за маласці апошняю звычайна ўяўляюць як складніковую сілу цяжару).

У самым агульным выглядзе лічбавую мадэль магчыма ўявіць у выглядзе сістэмы раўнанняў віда

$$\frac{\partial M}{\partial t} = F(x, y, z)$$

дзе M – значэнне метэаэлемента, F – сукупнасць дзейсных сілаў, t – час. Калі ж разглядаць падрабязней, то неабходна сказаць, што базісам большасці лічбавых мадэляў на сённяшні дзень з'яўляюцца шэсць выразаў, якія складаюць асноўную сістэму раўнанняў атмасферы: тры раўнанні руху (па аднаму на накірунак у дэкартавай сістэме каардынат), раўнанне непарыўнасці, раўнанне прытоку цяпла (першы пачатак тэрмадынамікі) і раўнанне Клапейрона-Мендзелеева. Раўнанні руху служаць выяўленнем дзейсных сілаў і закону захавання імпульса, раўнанне непарыўнасці – закону захавання масы, раўнанне прытоку цяпла – закону захавання энергіі, раўнанне Клапейрона-Мендзелеева служаць для звязкі ўсіх папярэдніх, а таксама для задавання апошняй зменлівай – шчыльнасці. Яны наступныя

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= G_x - 2\omega_y w + 2\omega_z v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) \\ \frac{dv}{dt} &= G_y - 2\omega_z u + 2\omega_x w - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right) \\ \frac{dw}{dt} &= G_z - 2\omega_x v + 2\omega_y u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{dT}{dt} - \frac{A}{c_p \rho} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{c_p \rho} \epsilon$$

$$p = R_p T$$

дзе u, v, w – праекцыі вектара хуткасці на асі x, y, z адпаведна, ω – кругавая хуткасць вярчэння Зямлі, G – сіла градыента, σ – аператар тэнзара дэфармацыі, A – работа, c_p – значэнне цеплаёмкасці пры пастаянным ціску, R – газавая канстанта. Індэксы x, y, z пасля некаторых членаў паказваюць праекцыі на восі каардынат.

Такая форма раўнанняў зручная, але прыдатна толькі для ідэалізаваных сімуляцый – аб'ектыўна з яе дапамогай магчыма апісваць толькі працэсы, якія адбываюцца на невялікай плошчы. З павелічэннем тэрыторыі, якая ахопліваецца разлікам (умова, неабходная для павышэння дакладнасці прагноза), свой уплыў пачынае аказваць шарападобнасць Зямлі. Таму неабходна пераўтварэнне раўнанняў у выгляд, які б узгадняўся з географічнымі каардынатамі. Гэта дазваляе зрабіць пераход да сферычнай сістэмы каардынат. Сістэма асноўных раўнанняў атмасферы ў ёй мае наступны выгляд

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \lambda} - \\ & - \frac{v_\lambda^2}{a} \operatorname{ctg} \theta = - \frac{1}{a\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + 2\omega \cos \theta v_\lambda + D_\theta; \\ & \frac{\partial v_\lambda}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_\lambda}{\partial z} + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial v_\lambda}{\partial \theta} + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial v_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{v_\theta v_\lambda}{a} \operatorname{ctg} \theta = \\ & = - \frac{1}{a\rho \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \lambda} - 2\omega \cos \theta v_\theta + 2\omega \sin \theta v_z + D_\lambda; \\ & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial v_z}{\partial \lambda} - \\ & - \frac{v_\theta^2 + v_\lambda^2}{a} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g - 2\omega \sin \theta v_\lambda + D_z; \\ & \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial \rho}{\partial \lambda} + \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{a} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{a \sin \theta} \frac{\partial v_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{v_\theta}{a} \operatorname{ctg} \theta \right) = 0; \\ & \frac{\partial T}{\partial t} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial T}{\partial \lambda} - \frac{\gamma_a}{g\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{v_\theta}{a} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{v_\lambda}{a \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \lambda} \right) = \frac{\varepsilon}{c_p \rho}. \end{aligned}$$

Яна даволі аб'ёмная. Але шэрагам членаў з-за іх нязначнасці магчыма знядбаць, і ў выніку раўнанні спростяцца (з-за пераўтварэнняў тут апушчана раўнанне Клапейрона-Мендзелева, бо яно нязначна змяняецца пры пераходзе да іншых сістэмаў каардынат).

Выкарыстанне сістэмы ў такой форме дазваляе зрабіць разлікі больш дасканалымі, але на практыцы часцей усяго ўжываюцца раўнанні ў іншых сістэмах каардынат, дзе параметр вышыні заменены на параметр ціску. Такім

чынам залежнай велічынёй становіцца вышыня, і гэта дазваляе зменьшыць колькасць вывядзенняў іншых параметраў, што ў выніку прыводзіць да спрашчэння разліка без страты якасці. Галоўнай з іх з'яўляецца ізабарычная сістэма каардынат. Асноўная сістэма раўнанняў у ёй мае выгляд

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \tau \frac{\partial u}{\partial p} &= -g \frac{\partial H}{\partial x} + lv; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \tau \frac{\partial v}{\partial p} &= -g \frac{\partial H}{\partial y} - lu; \\ T &= -\frac{g}{R} p \frac{\partial H}{\partial p}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial p} &= 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{RT(\gamma_a - \gamma)}{gp} \tau + \frac{1}{c_p p} \varepsilon.\end{aligned}$$

дзе τ – аналаг вертыкальнай хуткасці, H – геапатэнцыяльная вышыня, γ_a – сухааддыябатычны градыент, γ – рэальны вертыкальны градыент тэмпературы ў атмасферы.

Але для лічбавых мадэляў – у тым ліку і WRF – звычайна выкарыстоўваецца іншая сістэма каардынат – так званая σ -сістэма. У ёй ролю вертыкальнай каардынат іграе σ , якая ўяўляе сабой суадносіны значэнняў ціску на вышыні і ля паверхні зямлі (апошняя велічыня – зменная). Аналаг вертыкальнай хуткасці, які таксама пазначаецца як σ , разлічваецца па наступнай формуле

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma}{\partial y} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{d}{dt} \left(\frac{p}{p_s} \right) = \\ &= \frac{1}{p_s} \left(\frac{dp}{dt} - \frac{p}{p_s} \frac{dp_s}{dt} \right) = \frac{1}{p_s} \left(\tau - \sigma \frac{dp_s}{dt} \right) = \\ &= \frac{1}{p_s} \left[\tau - \sigma \left(\frac{\partial p_s}{\partial t} + u \frac{\partial p_s}{\partial x} + v \frac{\partial p_s}{\partial y} \right) \right],\end{aligned}$$

Формулы пераводу каардынат з ізабарычнай у σ -сістэму выглядаюць наступным чынам

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x_p} &= \frac{\partial}{\partial x_\sigma} - \frac{\sigma}{p_s} \frac{\partial p_s}{\partial x_\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma}; \\ \frac{\partial}{\partial y_p} &= \frac{\partial}{\partial y_\sigma} - \frac{\sigma}{p_s} \frac{\partial p_s}{\partial y_\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma}; \\ \frac{\partial}{\partial t_p} &= \frac{\partial}{\partial t_\sigma} - \frac{\sigma}{p_s} \frac{\partial p_s}{\partial t_\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma}; \\ \frac{\partial}{\partial p} &= \frac{1}{p_s} \frac{\partial}{\partial \sigma}.\end{aligned}$$

З іх улікам выводзіцца асноўная сістэма раўнанняў атмасферы ў σ -сістэме каардынат.

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{\sigma}{p_s} \frac{\partial H}{\partial \sigma} \frac{\partial p_s}{\partial x} + lv;$$

$$\frac{dv}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + g \frac{\sigma}{p_s} \frac{\partial H}{\partial \sigma} \frac{\partial p_s}{\partial y} - lu;$$

$$T = - \frac{g}{R} \sigma \frac{\partial H}{\partial \sigma};$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{\partial u p_s}{\partial x} + \frac{\partial v p_s}{\partial y} + \frac{\partial \sigma p_s}{\partial \sigma} = 0;$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{c_p \rho} \frac{\theta}{T} \varepsilon,$$

Каб ахапіць большы аб'ём разлічваных паказчыкаў і палепшыць якасць прагнозаў ужываюцца дадатковыя модулі ("блокі"), цесна злучаныя з асноўнай сістэмай. Так ва ўсіх сённяшніх мадэлях выкарыстоўваюцца ўдакладненні, якія дазваляюць улічваць уплыў хвалевага і вагальных працэсаў, сонечнай і іншай радыяцыі, вільгаці і энергіі, схаванай у ёй. Улік хваляў і ваганняў у атмасферы магчыма адзначаць, калі ў разліковую частку ўвесці законы сінуса (косінуса), экспанентную функцыю, раўнанне хвалі і змененыя ў адпаведнасці з ім раўнанні руху – для ўліку гравітацыйных хваляў. Радыяцыйныя працэсы ў лічбавых мадэлях адлюстроўваюцца з дапамогай раўнання балансу, якое у пашыранай форме мае выгляд

$$R_o(t, \varphi) = \int_M^0 E(\xi) dD(\xi) + 1,90(1 - \Gamma') \cos \theta [1 - 0,0090 \left(\frac{M}{\cos \theta} \right)^{0,303}] - \bar{a} E(T_o)$$

дзе $E(\xi)$ і $E(T_o)$ – струмені энергіі, $D(\xi)$ – прапусканне сонечнай радыяцыі, θ – вугал падзення променя, Γ' – паслабленне сонечнай радыяцыі на верхняй мяжы атмасферы ($\approx 0,08$), $\bar{a}$ – сярэдняя паглынальная здольнасць і $M = \int_0^\infty \rho dz$, а тамсама законаў выпраментваання (Планка, Стэфана-Больцмана, Бугера-Ламберта-Бэра, Ламберта і Кіргхофа). Улік вільгаці на атмасферныя працэсы ажыццяўляецца з дапамогай раўнанняў пераносу вільгаці, характарыстых фазавых пераходаў, формул перадачы энергіі пры фазавых пераходах – часткова размова пра гэта ішла раней. Таксама маюцца спецыяльныя модулі для ўліку ўплыва атмасфернай аэразолі і хімічных працэсаў, што адбываюцца ў паветры.

Неабходна адзначыць, што лічбавая мадэль можа быць пабудавана і не на падставе асноўнай сістэмы раўнанняў атмасферы. У такіх выпадках выкарыстоўваюцца раўнанні вихора і дывергенцыі. Для агульных выпадкаў раўнанне вихора хуткасці (спрошчанае) выглядае наступным чынам

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y} = -l \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - u \frac{\partial l}{\partial x} - v \frac{\partial l}{\partial y}$$

дзе $\Omega = \text{rot} V = \Omega_x + \Omega_y + \Omega_z$ – вектар вихора хуткасці, а $l = 2\omega \sin \varphi$ – параметр Карыяліса, зменная велічыня. Раўнанне дывергенцыі (плоскай) запісваецца як

$$\frac{dD}{dt} - \frac{1}{2} \Omega^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} D^2 + \frac{\partial \tau}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial p} - l \Omega + u \frac{\partial l}{\partial y} - v \frac{\partial l}{\partial x} = -g \Delta H$$

дзе $H=H(x_\sigma, v_\sigma, \sigma, t_\sigma)=u, v, T, z$ – функцыя каардынат σ -сістэмы, $\tau=-g\rho\omega$ – аналаг вертыкальнай хуткасці ў ізабарычнай сістэме каардынат. Таксама гэтыя раўнанні магчыма выкарыстоўваць у якасці дадатку да асноўнай сістэмы.

Развіццё лічбавага мадэлявання як накірунка метэаралогіі пачалося ў першай палове XX ст. і звязана з фаміліямі такіх выбітных даследчыкаў, як Б'ёркнес і, у першую чаргу, Рычардсан. Нягледзячы на тое, што першыя спробы не былі паспяховымі, ідэя магчымасці прагназавання надво'я з дапамогай раўнанняў гідратэрмадынамікі распаўсюджвалася па свеце, і ў сярэдзіне стагоддзя праблемамі лічбавага мадэлявання займаліся вучоныя ў розных краінах – у тым ліку і ў СССР (работы акадэміка Кібеля). Пераварот у вобласці адбыўся ў пяцідзясятыя-шасцідзясятыя гады, калі пачалі распаўсюджвацца ЭВМ і з'явіліся ШСЗ. З'явілася магчымасць атрымліваць больш дадзеных і хутчэй ажыццяўляць разлікі. Таму за наступныя 25-30 год лічбавае мадэляванне стала пануючым накірункам у метэаралогіі. За гэтыя часы з'явіліся першыя асноўныя тыпы мадэляў (баратропныя, бараклінныя, а таксама заснаваныя на квазігеаграфічным і квазісаладальным набліжэннях), якія развіліся ў комплексныя сучасныя праграмныя комплексы. На сённяшні дзень існуе шмат мадэляў, якія выкарыстоўваюцца для розных мэтай (даследванні, прагноз, інтрапаляцыя дадзеных па сетцы, імітацыі і інш.) і адрозных адна ад адной па шэрагам параметраў. Таму мадэлі класіфікуюць па:

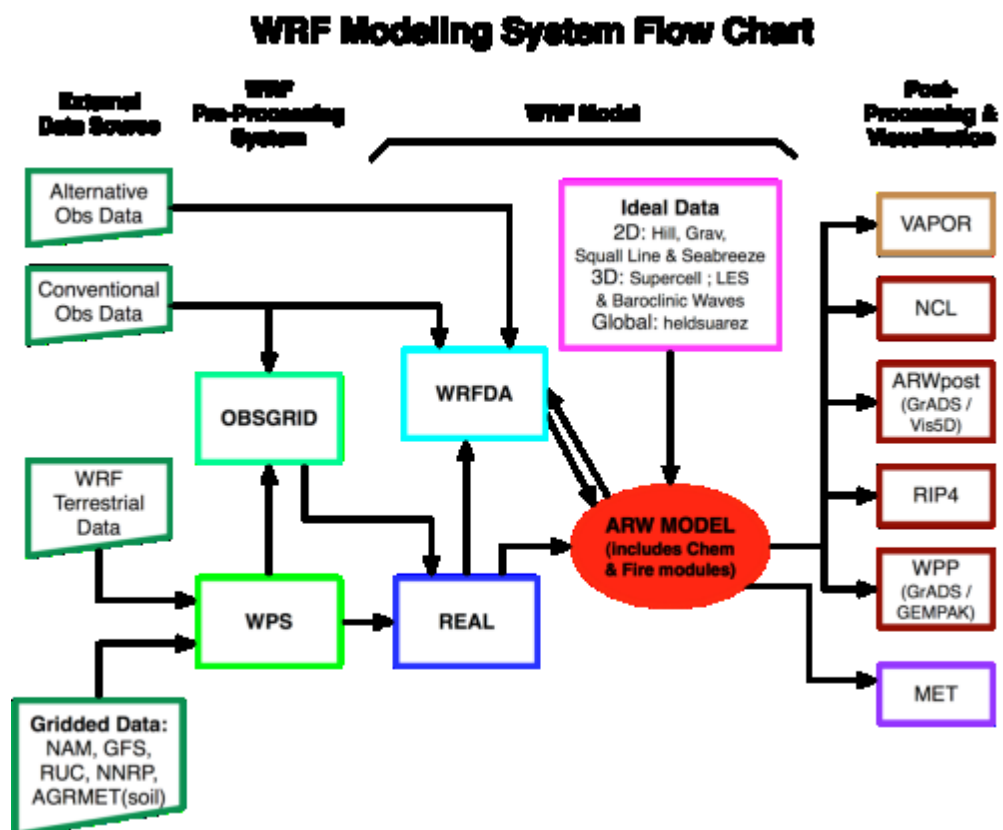
- прастораваму маштабу працэсаў, што мадэлююцца: глабальныя, рэгіянальныя і мезамасштабныя (лакальныя), таксама нярэдка выдзяляюць так званыя паўсферныя мадэлі;
- часавому маштабу працэсаў, якія мадэлююцца: мадэлі разліку каротка-, сярэдне- і доўгатэрміновых прагнозаў, а таксама кліматычныя мадэлі;
- вертыкальнаму маштабу, г. зн. колькасці ўзроўняў, але таксама ўжываецца тыпізацыя па сістэме каардынат (z-сістэма, p-сістэма, σ -сістэма);
- метаду рашэння раўнанняў: спектральныя і канечна-рознасныя;
- поўнасці і дакладнасці параметрызацый працэсаў подсетачнага маштаба, г. зн. па фізіцы мадэлі (улік турбулентнасці, сонечнай радыяцыі, абмена цяплом і вільгаццю, канвекцыі, мікрафізічных працэсаў);
- выгляду разліковай сетцы мадэлі: прамавугольная, трохвугольная, шыротна-даўготная, экватарыяльна-павёрнутая;
- таксама маецца тыпізацыя па кроку сетцы.

Кожная мадэль мае свае плюсы і недахопы, таму ў мэтах большай дакладнасці лепш выкарыстоўваць некалькі мадэляў адначасова – так, напрыклад, у РГМЦ выкарыстоўваецца восем лічбавых сродкаў: UM, UKMO, Cosmo, GFS, MM5, САП, РЭП (Расчёт Элементов Погоды) і мадэль В. М. Лосева. Таксама ў апошнія часы там у практыку ўводзіцца адна з найбольш распаўсюджаных і дасканалых мадэляў на сённяшні дзень – WRF (Weather Research and Forecast), якая выкарыстоўвалася як галоўны сродак у дадзенай рабоце.

4.2. МЕЗАМАСШТАБНАЯ МАДЭЛЬ WRF І ЯЕ МАГЧЫМАСЦІ ДЛЯ ПРАГНАЗАВАННЯ

Лічбавая мадэль Weather Research and Forecast (WRF) на сённяшні дзень з'яўляецца адной з найбольш ужывальных і дасканалых у свеце. Яна распрацоўваецца Нацыянальным цэнтрам Атмасферных Даследванняў ЗША (NCAR) пры падтрымцы Нацыянальнага Цэнтра Прагнозаў Навакольнага Асяроддзя (NCEP) [88]. Мадэль знаходзіцца ва ўсеагульным доступе і мае адкрыты праграмны код – гэта значыць, што карыстацца ёй могуць усе жадаючыя, а таксама ў яе структуру магчыма ўносіць змяненні ў адпаведнасці з мэтамі работы. Такі крок не толькі дазваляе атрымліваць доступ да выдатнага сродка, але і паляпшае магчымасці для ўдасканалення. Распрацоўка WRF пачалася ў другой палове 1990-х. Базай для яе стала другая мадэль – MM5, якая таксама ўсё яшчэ выкарыстоўваецца. З таго часу было зроблена шмат удасканаленняў і ўдакладненняў, у выніку чаго разліковыя магчымасці значна пашырыліся – цяпер з дапамогай WRF нельга разлічыць толькі электрычныя паказчыкі, а так асноўныя і дадатковыя метэаэлементы, ход хімічных працэсаў у атмасферы, радыяцыйныя працэсы і шмат чаго іншага магчыма даследаваць і прагназаваць з дапамогай спецыяльных модуляў.

Сама мадэль ўяўляе сабой не адзіную праграму, а цэлую сістэму, не вельмі складаную, але даволі аб'ёмную і з выразнай іерархіяй. Увогуле структуру WRF магчыма адлюстравать з дапамогай наступнай схемы:



Мал. 4.2.1. Структура сістэмы лічбавага мадэлявання WRF (з версіі 3.0.) [88]

Як бачна, ўвесь комплекс магчыма падзяліць на 4 часткі: знешнія крыніцы дадзеных, сістэма прэдапрацэсінга (падрыхтоўкі дадзеных непасрэдна да разлікаў), уласна разліковы модуль і сістэмы постпрацэсінга і візуалізацыі.

Так, знешнія крыніцы дадзеных – гэта “пастаўшчыкі” абсалютна ўсёй неабходнай для разлікаў інфармацыі. У першую чаргу гэта звесткі пра паверхню зямлі, геаграфічную сетку (у яе склад уваходзіць інфармацыя і аб вертыкальных узроўнях; разам з папярэднім пунктам яна звычайна складае адну сістэму файлаў) і сама метэаралагічная інфармацыя, структураваная па сетцы (напрыклад, дадзеныя ў кадах GRID і GRIB). Пры гэтым важна, каб маштаб сеткі падсцілаючай паверхні быў роўным ці буйнейшым, але кратным маштабу сеткі метэаралагічных дадзеных – інакш сумясціць іх не атрымаецца, і разлік будзе немагчымы.

Далей ідуць сістэмы падрыхтоўкі дадзеных. Гэта праграмныя комплексы WPS, REAL і WRFDA. Звычайна яны актывізуюцца паслядоўна адзін за адным. WPS прызначана для таго, каб сумяшчаць файлы метэаралагічных дадзеных з геаграфічнай сеткай, што прыстасавана да мадэлі (залежнасць атмасферы ад паверхні Зямлі – адна з найбольш моцных, і дадзеная сістэма падрыхтоўкі займаецца тым, што робіць яе магчымай падчас лічбавага разліку). Сістэма REAL стварае межавыя ўмовы – пры разліках на мезамасштабных мадэлях ніколі вобласцю цікаўнасцяў зямны шар не з’яўляецца, таму для таго, каб не марнаваць рэсурсы ЭВМ і час, разліковую вобласць, дамен, абмяжоўваюць. Сістэма REAL гэтым і займаецца. WRFDA была ўведзена адносна нядаўна. Гэта сістэма асіміляцыі дадзеных, якая запускаяецца непасрэдна перад разлікам і дазваляе яго спрасціць і паскорыць, зрабіўшы эфектыўнае распаралельванне – размеркаванне разлікаў асобных метэаэлементаў па асобных працэсарах ЭВМ. Падчас выканання разлікаў для дадзенай работы яне не ўжывалася, і ў разліковы модуль інфармацыя ўводзілася адразу пасля апрацоўкі ў сістэме REAL.

Разліковы модуль, ці дынамічнае ядро – гэта сэрца мадэлі. У WRF іх два: сістэмы ARW і NMM (не адлюстравана на схеме). Першая сістэма з’яўляецца больш дакладнай, таму ўжываецца часцей – хаця і другая сістэма мае свае дадатныя рысы: напрыклад, яна лепей падыходзіць да разлікаў на дастаткова вялікай тэрыторыі. Іх структура падобна тыповай для звычайнай лічбавай мадэлі, што апісана ў папярэдняй главе. Але неабходна пазначыць наступныя асаблівасці: разліковыя ядра WRF улічваюць гідрастатычнае набліжэнне, разлікі ажыццяўляюцца згодна сеткам Аракавы (у праграму закладзены ўсе тыпы, і маецца магчымасць выбару), у якасці вертыкальнай сістэмы каардынат ужываецца η -сістэма, дзе $\eta = (p_{\text{узр}} - p_0) / \mu$, $\mu = p_{\text{пав}} - p_0$ (з 27-ю ўзроўнямі; зараз колькасць павялічана да 35-і) – мадыфікаваная σ -сістэма, маюцца асобныя модулі для разлікаў радыяцыйных і хвалевых працэсаў, а таксама канвекцыі. Дапаможныя разліковыя модулі дазваляюць ужываць да парадка дзесяці схемаў параметрызацый працэсаў – столькі ж схемаў маецца і для параметрызацыі

характарыстык падсцілаючай паверхні. Але схемаў параметрызацыі мікрафізікі маецца болей – каля дваццаці.

Неабходна адзначыць, што актывацыя сістэмы падрыхтоўкі дадзеных WPS і дынамічных ядзер мадэлі ажыццяўляецца з дапамогай спецыяльных файлаў (скрыптоў), у якіх называюцца ўсе неабходныя для разліку ўмовы: задаюцца даты, час і прасторавыя каардынаты, вызначаюцца шляхі да тэчак і файлаў, задаюцца крокі, выбіраюцца схемы параметрызацый, актывізуюцца дадатковыя функцыі і г. д.

Апошні блок – гэта сістэмы постпрацэсінга і візуалізацыі. Яны неабходны для пераўтварэння разліковых дадзеных ў зручныя для аналізу карты, вертыкальныя разрэзы і графікі. Часцей ўсяго выкарыстоўваюцца комплексы праграмаў NCL (для стварэння 2-хмерных картаў і схемаў) і VAPOR (для стварэння 3-хмерных картаў і схемаў).

Акрамя ўсяго гэтага ў склад WRF на сённяшні дзень уваходзіць шэраг дадатковых модуляў. Найбольш буйным з іх з'яўляецца WRF-Chem. Гэта сістэма, якая дазваляе ажыццяўляць мадэляванне ходу хімічных працэсаў, разлік колькасці малых складніковых атмасферы, перанос часцінак і газаў. Таксама там маецца вялікі і дасканалы блок для разлікаў паказчыкаў атмасфернай аэразолі. У апошнія часы ў практыку пачынае ўводзіцца яшчэ адзін вялікі модуль, які прызначаны для разліку гідралагічных характарыстык – выкарыстоўваючы дадзеныя метэаралагічных разлікаў, ён дазволіць вылічыць змяненні ўзроўняў, расходаў і іншых характарыстык сцёку.

WRF ужо ўяўляе сабой буйнейшы і дакладны праграмны комплекс, і ён працягвае развівацца і ўдасканальвацца.

4.3. ПАРАМЕТРЫЗАЦЫЯ КАНВЕКЦЫЙНАЙ ВОБЛАЧНАСЦІ І НАВАЛЬНІЦ

Згодна тэрміну параметрызацыя – гэта шлях прадстаўлення лакальных фізічных працэсаў падчас разлікаў для дробнага маштабу (з вялікім гарызантальным крокам сеткі), з дапамогай адпаведных матэматычных фармулёвак. У WRF падобныя схемы распрацаваны для ўсіх асноўных з’яў і характарыстык, у тым ліку і канвекцыі.

Паколькі фізіка-матэматычная схема ўплыву электрычных токаў атмасферы на метэаралагічныя працэсы яшчэ не распрацавана ні для адной мадэлі, параметрызаць магчыма толькі сам працэс канвекцыі і воблакі як яго наступства. Увогуле параметрызацыя канвекцыйных воблакаў – гэта сродак выяўлення ўплыву невялікіх *Cumulus* і неглыбокай канвекцыі ў тым ліку падсетачнага маштабу (г. зн. меншага, чым крок сеткі) на іншыя атмасферныя працэсы, больш маштабныя. Асноўная ўвага ў іх надаецца адлюстраванню вертыкальных узыходных і сыходных рухаў паветра, пераносу колькасці маamenta руху, але сённяшнія схемы дазваляюць улічваць таксама перанос цяпла і вільгаці.

У разліковай сістэме WRF для параметрызацыі ўжываецца шэраг схемаў, але найбольш распрацаванымі і распаўсюджанымі з’яўляюцца наступныя [88]:

- **Схема Каіна-Фрытшча.** Першая з распрацаваных для мадэлі параметрызацый. Акцэнт у ёй зроблены на пераносе вільгаці ўзыходнымі і сыходнымі плынямі, але яна дазваляе адсочваць уплыў уцягвання і расцягвання паветра падчас канвекцыі, а таксама простых мікрафізічных працэсаў. Пры гэтым уцягванне накладвае абмежаванні на маштаб канвекцыі і мае функцыянальную залежнасць ад сыходжання паветра на ніжніх узроўнях. Неглыбокая канвекцыя можа быць распаўсюджана шырока толькі пры ўмове сухасці паветра – інакш накладваюцца абмежаванні. Асноўны параметр, па якім праводзіцца набліжэнне – канвекцыйная даступная патэнцыяльная энергія (CAPE).
- **Схема Беттса-Міллера-Ян’іка.** Гэта адзіная з усіх схемаў у спісе, якая заснавана не на вылічэнні струменя масы, а на канкрэтызацыі. У ёй глыбокая канвекцыя і час рэлаксацыі залежаць ад ККД воблакаў, а ён, у сваю чаргу, залежыць ад энтрапіі, вільготнасці і сярэдняй тэмпературы. Паказчыкі неглыбокай канвекцыі таксама выводзяцца адпаведна са значэннем энтрапіі. Разлік вышыняў верхняй мяжы воблака ў гэтай схеме ажыццяўляецца з улікам перамешвання паветра з навакольным асяроддзем, а уплыў сілы плывучасці павышаецца.
- **Схема Грэлла-Дэвені.** Гэта ансамблевая схема, якая размяркоўвае канвекцыйныя воблакі па вочках сеткі, а потым праводзіць іх асерадненне для забеспячэння зваротнай сувязі ў мадэлі. Вочкам магчыма надаваць розную вагу ў залежнасці ад магутнасці канвекцыі, але па змаўчанні вага

ўсіх звёнаў аднолькавая. Яна заснавана на вылічэнні струменяў масы, але ў яе ўключаны розныя значэнні для ўцягвання і расцягвання пры ўзыходных і сыходных рухах паветра, а таксама выпадзення ападкаў. Схема прадугледжвае статычны кантроль (які якраз і заснаваны на разліках струменяў масы) і дынамічны кантроль (заснаваны на вылічэнні САРЕ, вертыкальнай хуткасці на ніжніх узроўнях і сыходжання струменяў вільготнасці).

- Схема Грэлла №3. Яна заснавана на папярэдняй схеме, але мае шэраг адрозненняў і ўдакладненняў. Так, гэта таксама ансамблевая схема, але з яе складу выключана квазіраўнаважнае набліжэнне. Яшчэ ў ёй магчыма разлік эфекта прыгнечання канвекцыйнай вочкай суседніх, што дазваляе ўдакладніць параметрызацыю вочкаў малых памераў.

Ужыванне параметрызацыі канвекцыйных воблакаў неабходна, калі праводзяца разлікі з крокам па гарызанталі ад 10 км і болей – радзей, калі гэта неабходна ўмовам задання, параметрызацыю патрэбна выкарыстоўваць пры кроках памерам 5-10 км. Але калі памер звяна сеткі не перавышае 5 км, то выкарыстанне параметрызацыі немэтазгодна, бо пры такіх значэннях мадэль здольна разрашыць канвекцыю і без ужывання параметрызацый. Для разлікаў практычнай частцы работы выкарыстоўваўся гарызантальны крок у 3333,33 м, таму параметрызацыі не ўжываліся.

Большае ж значэнне для работаў мела параметрызацыя мікрафізічных працэсаў, якая неабходна пры любых разліках. Выкарыстаныя схемы №8 (Томпсана), №7 (Годдарда), №9 (Мілбрандта-Яу, 2-хмаментная), №17 і №18 (схемы NSSL, 2-хмаментныя) хаця і падобныя ў сваёй аснове, маюць шэраг значных адрозненняў. Так, для іх характэрна розная ступень дакладнасці апісанняў фізічных працэсаў: у схемах NSSL яна найменшая (спецыяльна зробленая спрашчэнне для паскарэння разлікаў), а ў схеме Мілбрандта-Яу найбольшая. Схемы №7 і №8 па дакладнасці крыху саступаюць дзявятай. Акрамя гэтага схемы адрозніваюцца і па колькасці зменлівых, якія ўжываюцца ў разліку: калі разглядаць масавыя зменлівыя, то у схемах Годдарда і Томпсана ужываюцца 5 параметраў (воблачныя часцінкі вільгаці, кроплі дажджу, крышталікі ільду, снег і ледзяная крупа), а ў схемах Мілбрандта-Яу і NSSL маецца яшчэ і град; калі разглядаць лічбавыя зменлівыя, то ў схеме Годдарда іх няма, у схеме Томпсана іх дзве (адпавядаюць ільду і кроплям дажджу), у схемах №9 і №17 іх шэсць (адпавядаюць усім масавым зменлівым), а ў схеме №18 – восем (яшчэ дзве лічбавыя зменлівыя якраз і служаць для разліку ядзер кандэнсацыі).

Параметрызацыі астатніх неабходных для разлікаў паказчыкаў (радыацыйных працэсаў, асаўлівасцяў падсцілаючай паверхні, межавых умоў) былі ўсталяваны па змаўчанні, бо даюць добрыя вынікі для тэрыторыі Беларусі.

4.4. ЗДОЛЬНАСЦІ МАДЭЛІ WRF ДЛЯ ЗАСВАЕННЯ ХАРАКТАРЫСТЫК КАНВЕКЦЫЙНАЙ ВОБЛАЧНАСЦІ І НАВАЛЬНІЦ

Лічбавая мадэль WRF – шматзадачная. Яна прыдатная для разлікаў розных з’яў надвор’я, у тым ліку канвекцыйных і навальнічных воблакаў. І якасць разам са ступенню дакладнасці гэтых разлікаў даволі высокая – гэта пацверджваюць эксперыменты па мадэляванні выключных выпадкаў ці проста моцных навальніц, якія нанеслі значную шкоду ці пагражалі яе нанесці [9,16]. Дадзеныя работы паказваюць, што WRF здольна не толькі мадэляваць навальніцы ўвогуле, але і разлічваць уплыў пэўных яе элементаў: напрыклад, зацяняльны эфект воблачнай кавадлы, і болей – аж да мадэлявання пэўнага разраду маланкі па імгненнаму шматкратнаму пацяпленню (падобныя разлікі магчымы толькі пры ўмове значных змяненняў і ўдакладненняў у кодзе мадэлі, таму гэта быў адзінкавы эксперымент).

Што тычыцца непасрэдна дадзенай работы, то у разліках, якія праводзіліся тут, WRF паказала сабе добра: толькі ў адным з дзесяці выпадкаў яна не паказала канвекцыйных воблакаў і навальніцы (Пінск, 23 ліпеня 2012 года) – так узнаўленні падзеі пацвердзілі назіранні прыземных метэастанцый. Хаця і назіраліся хібнасці – да 1-1,5 гадзін па асі часу і да 30-40 км па гарызанталі. Прыкметна тое, што ўсе выкарыстаныя схемы параметрызацыі мікрафізікі давалі падобныя вынікі як па колькаснаму значэнню паказчыкаў, так і па месцазнаходжанні ў прасторы і на асі часу.

Неабходна адзначыць тое, што выкарыстаннем нейкай адной пэўнай схемы параметрызацыі дамагчыся найбольш дакладных разлікаў нельга – найлепшыя вынікі дае сумеснае выкарыстанне схемаў №7, №8 і №9 – гл. Дадатак (Мал. 36 – 68). Схема Годдарда дае лепшыя вынікі па разліках паказчыкаў ветра, схема Мілбрандта-Яу – па колькасці часцінак розных фазаў вільгаці, схема Томпсана – па месцазнаходжанні абласцей распаўсюджвання вільгаці (схема №9 па гэтаму параметру дае значныя хібнасці), а таксама паказчыкаў тэмпературы. Розніца ў значэннях атмасфернага ціску, атрыманая пры разліках з выкарыстаннем розных схемаў, нязначная. Актывацыя функцыі дэмпфавання дапамагае зрабіць канвекцыю больш выяўленай, але крыху ўзмацняе яе.

Таксама патрэбна сказаць, што паказчыкі, што выкарыстоўваюцца ў WRF, не заўсёды супадаюць з тымі, якія атрымліваюць на станцыях ГСН – найбольш ужывальныя паказчыкі колькасці вільгаці будуць добрым прыкладам. Непасрэдныя дадзеныя з пунктаў назірання ўжываць у мадэлі ў якасці пачатковых дадзеных нельга. Але неабходная інфармацыя выводзіцца менавіта з дадзеных назіранняў – інтэрпалуюцца на вузлы сеткі, па тым значэнням, што маюцца, разлічваюцца іншыя, патрэбныя для разліку і т. д. Увогуле атрымліваецца, што мадэль часцей усяго проста апэруе большай колькасцю параметраў, чым спецыяліст пры складанні сінаптычнага прагноза.

Таму магчыма сказаць, што WRF мае добрыя магчымасці па засваенню характарыстык канвекцыйнай воблачнасці і навальніц.

РАЗДЗЕЛ 5. ВЫНІКІ МАДЭЛЯВАННЯ КАНВЕКЦЫЙНАЙ ВОБЛАЧНАСЦІ І НАВАЛЬНІЦ

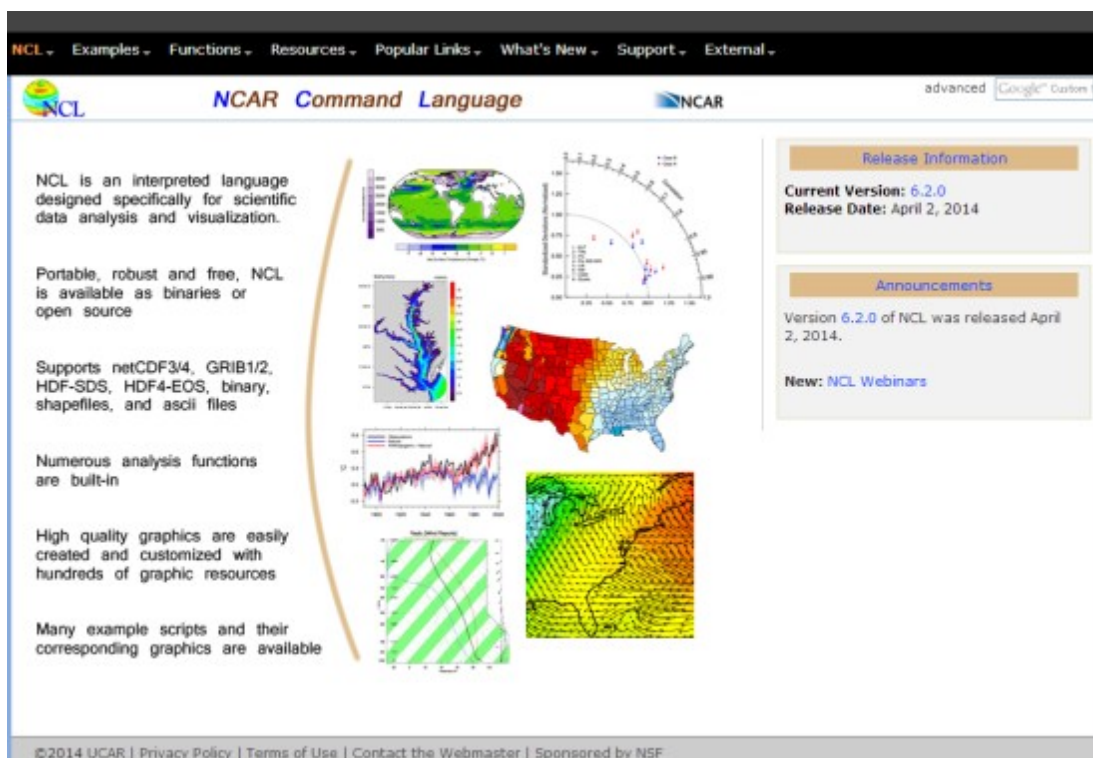
Непасрэдным вынікам лічбавых разлікаў з’яўляюцца наборы выхадных файлаў. Іх колькасць вызначаецца зададзеным часавым крокам, а таксама з дапамогай спецыяльнай функцыі ўваходнага файла, якая дазваляе спалучаць вынікі за некалькі тэрмінаў у адзін файл. Там у форме структураванага кода месціцца ўся інфармацыя, якая была пазначана як неабходная ва ўваходным файлы для дынамічнага ядра. Хаця гэтыя файлы ўтрымліваюць усё неабходнае для аналізу, для непасрэднага выкарыстання яны не вельмі зручныя – бо, фактычна, уяўляюць сабой рады і табліцы дадзеных – таму часцей усяго яны з’яўляюцца толькі прамежкавымі вынікамі і падвргаюцца далейшай апрацоўцы, а па ўтрыманню саміх файлаў з дапамогай спецыяльных праграмных сродкаў і візуальна ажыццяўляецца кантроль якасці і дакладнасці разлікаў.

Прыдатнымі і зручнымі для выкарыстання людзьмі выхадныя файлы становяцца пасля апрацоўцы на сістэмах постпрацэсінга і візуалізацыі. На Мал. 4.2.1. Прыведзены прыкладны некаторых такіх праграмных комплексаў. З сістэмаў візуалізацыі дадзеных найбольш распаўсюджанымі і ўжывальнымі з’яўляюцца комплексы NCL і VAPOR – для стварэння графікаў, картаў, профіляў і вертыкальных разрэзаў на плоскасці і ў трохмерным асяроддзі адпаведна.

Для правядзення аналізаў неабходных для выканання пазначаных задач, двухмерных картаў, схемаў, графікаў і разрэзаў было дастаткова, таму выкарыстоўваўся толькі сродак візуалізацыі NCL.

5.1. ВІЗУАЛІЗАЦЫЯ ВЫНІКАЎ МАДЭЛЯВАННЯ

Для гэтых мэтаў быў выкарыстаны сродак NCL. Сам NCL (NCAR Command Language) уяўляе сабой даволі складаны комплекс, у які ўваходзяць непасрэдна адказныя за візуалізацыю модулі, а таксама спецыяльная мова праграмавання, прызначаная для напісання ўваходных файлаў-скрыптоў, згодная якім і ажыццяўляецца візуалізацыя. Неабходна адзначыць, што для працы NCL патрабуе шэраг іншых адказных за візуальнае прадстаўленне дадзеных праграмаў – у першую чаргу спецыяльных модуляў, адказных за працу з картаграфічнымі праекцыямі (у сам комплекс NCL яны не ўключаны з-за рознасцяў патрэбаў карыстачоў). Распрацоўваецца гэты сродак з канца 1990-х у Нацыянальным цэнтры Атмасферных Даследванняў ЗША, як і WRF. Таму зразумела, што яны рабіліся сумяшчальнымі, каб было магчыма зручна працаваць з абодвума праграмнымі сродкамі. Але NCL ужываецца не толькі для візуалізацыі дадзеных лічбавых разлікаў – яго магчыма выкарыстоўваць і для апрацоўкі звестак з баз дадзеных, і для аналітычных мэтаў. Магчыма выкарыстоўваць розныя картаграфічныя праекцыі, розныя віды схемаў. NCL прыдатны для працы і з метэаралагічнымі, і з кліматычнымі, і з гідралагічнымі дадзенымі. Апрацоўка вынікаў разлікаў WRF – толькі частка комплексу сродка. Гэтыя асалівасці наклалі свой адбітак на сінтаксіс мовы NCL: з-за абмежаванасці сферы ўжывання сінтаксіс таксама абмежаваны, болей, чым для “моў агульнага прызначэння”, але ў ім маецца шмат убудаваных функцый – так, толькі для апрацоўкі дадзеных WRF іх існуе каля двухста – усяго ж іх на парадак болей. Таму патрэбны дапаможнікі, размешчаныя на сайце сродка [89].



Мал. 5.2.1. Галоўная старонка сайта NCL з прыкладамі картаў і графікаў [89]

Для спрашчэння працы карыстачоў на сайце разам з дапаможнікамі прыведзены прыклады гатовых скрыптоў для візуалізацыі дадзеных. Але яны маюцца толькі для некаторых велічыняў, плюс разлічаны на апрацоўку аднаго файла, а не паслядоўнага шэрагу. Таму пры візуалізацыі дадзеных разлікаў падчас выканання работы яны не выкарыстоўваліся – ужываліся скрыпты, зробленыя іншымі студэнтамі з папярэдніх курсаў. Яны не дазваляюць ахапіць увесь спектр метэаралагічных велічыняў, але даюць магчымасць апрацоўваць рад выхадных файлаў WRF паслядоўна, што значна спрашчае і паскарае працу. У гэтых скрыптах ужо меліся каманды на візуалізацыю асноўных метэаралагічных параметраў – уласны ўнёсак складаўся толькі ў дадаванні магчымасці адлюстравання колькасці часцінак фазы снега, бо яго улік як цвёрдых часцінак быў неабходны. Выкарыстоўваючы іх, былі пабудаваны карты для ўсёй плошчы разліковага дамена і вертыкальныя разрэзы, якія перасякаюць цэнтральную частку дамена з паўднёвага захада на паўночны ўсход і з паўночнага захаду на паўднёвы ўсход (з пункта з каардынатамі (75;75) да пункта (175;175) і з пункта (75;175) да пункта (175;75) адпаведна – з улікам памеру дамена 250x250 пунктаў) – гэта было зроблена для таго, каб канвекцыйныя звыены сталі больш заўважнымі (пры правядзенні лініі разрэза скрозь усю плошчу дамена выявіць вочкі па структуры ліній току было б надзвычай складана). Для кожнага разліка былі пабудаваны карты тэмпературы і ветру на ўзроўні 1000 гПа, атмасфернага ціску на ўзроўні мора, хуткасці ўзыходных і сыходных рухаў паветра, суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталікаў, дажджавых кропель і снега, акумуляванай колькасці ападкаў (вадкіх), радыёрэха, вышыняў геапатэнцыяльных паверхняў 850, 700, 500, 300 і 100 гПа; разрэзаў было пабудавана па чатыры для кожнага накірунка – для адлюстравання суадносін сумесяў фазаў вільгаці (значэнні тэмператур на вышынях і лініі току ветра, даўжыня якіх была прапарцыянальна хуткасці, меліся на кожным разрэзе). Уваходныя дадзеныя і пазначаныя ў скрыпце-“актыварары” значэнні мелі высокі дазвол, таму выхадныя файлы меліся для кожнага трыццаціхвіліннага тэрміна, пачынаючы ад 00:00 і сканчаючы 23:30. Гэта дало магчымасць правесці падрыбны аналіз, прасачыць развіццё і эвалюцыю атмасферных утварэнняў і атрымаць адказы на пастаўленыя з рабоце задачы і пытанні.

ЗАКЛЮЧЭННЕ

Хаця вывучэнне канвекцыйных воблакаў і навальніц пачалося даволі даўно, даследванні па гэтых накірунках яшчэ праводзяцца. Зразумела, што большасць асноўных заканамернасцяў ужо выяўлена, таму зараз пераважную частку складаюць прыватныя даследванні, але удакладненні і новыя факты ў галіну агульных даследванняў усё яшчэ ўносяцца. Дадзеная работа – яшчэ адзін невялікі ўнёсак у гэтую сферу метэаралагічнай навукі.

Пасля вывучэння тэарэтычных матэрыялаў па тэме – агляда літаратурных крыніц, характарыстыкі разглядаемых працэсаў як фізічных з’яў атмасферы – у адпаведнасці з распрацаванай метадыкай былі праведзены практычныя работы. Адказы на пастаўленыя пытанні і задачы былі атрыманы. Высветлілася, што размеркаванне канвекцыйных воблакаў і навальніц па тэрыторыі Беларусі даволі аднастайнае, і няма ярка заўважнай прывязкі пэўных асаблівасцяў да рэгіёнаў, але шэраг заканамернасцяў назіраецца: павелічэнне сярэдняй вышыні ніжняй мяжы воблакаў ад зімы да лета і з поўначы на поўдзень, амаль поўная адсутнасць назіранняў выключна канвекцыйных воблакаў у халодны перыяд і іх абсалютная перавага ў цёплы, рэзкае павелічэнне колькасці тэрмінаў назіранняў воблакаў вертыкальнага развіцця з ападкамі ў зімовы час, прыпаданне амаль усіх выпадкаў назірання навальніц на цёплы перыяд года і г.д. Апынулася, што структура канвекцыйных вочак для тэрыторыі Беларусі не залежыць ад умоў падсцілаючай паверхні з-за іх адноснай аднастайнасці, і што структура вочак – пры ўмове падабенства рэльефа – не залежыць ад кліматычнага пояса, у якім развіаецца воблака. Было вынайздзена, што вызначаць навальнічныя воблакі сярод іншых канвекцыйных – па шэрагу выпадкаў для тэрыторыі Беларусі – магчыма па хуткасці вятроў у абласцях распаўсюджвання цвёрдых часцінак вільгаці, памерам зонаў узаемадзеяння (накладання) абласцей распаўсюджвання часцінак чатырох асноўных фазаў, а таксама па колькасці часцінак фазы воблачных кропель на пачатку развіцця навальніцы. Шэраг лічбавых эксперыментаў выявіў, што для дасягнення найбольшай дакладнасці пры лічбавых разліках канвекцыйнай воблачнасці неабходна карыстацца ансамблем схемаў параметрызацыі мікрафізікі №7, №8 і №9. З улікам кроку разлікі мелі даволі невялікую хібнасць для мезамасштабнай мадэлі: $\pm 15\text{--}35$ км па гарызанталі, 1-2 км па вертыкалі і да 1-1,5 гадзін па асі часу.

Атрыманыя высновы, хаця і з’яўляюцца аднаўленнем-сімуляцыяй падзей мінулага, могуць быць выкарыстаны ў метэаралагічнай прагнастычнай практыцы. Лічбавая мадэль WRF, якая выкарыстоўвалася ў якасці галоўнага сродка, з’яўляецца адной з найбольш дасканалых на сённяшні дзень, шматфункцыянальная і ў многіх цэнтрах выкарыстоўваецца для прагназавання надвор’я на кароткія тэрміны. Уводзіцца яна ва ўжыванне і ў РГМЦ Беларусі. Таму, выкарыстоўваючы вынікі дадзенай работы падчас разліковых працаў,

магчыма значна павысіць дакладнасць прагназвання канвекцыйных воблакаў і, асабліва, навалыніц.

СПІС ВЫКАРЫСТАНЫХ КРЫНІЦ

1. Jameson, A.R. A Bayesian approach to upscaling and downscaling of aircraft measurements of the ice particle counts and size distribution / A.R. Jameson, A.J. Fleymisfield // *Journal of Applied Meteorology and climatilogy*. – 2013/ vol. 52, is. 9. – p. 2075-2088.
2. A fuzzy logic method for lightning prediction using thermodynamic and kinematic parameters from radio sounding observations in South Korea / B. Kuk [et al.] // *Weather and Forecasting*. – 2012. – vol. 27, is. 1. – p. 205-217.
3. Oberthaler, A.J. A numerical simulation study of the effect of anvil shading on quasi-linear convective systems / A.J. Oberthaler, P.M. Markowski // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2013. – vol. 70, is. 3. – p. 767-793.
4. Masunaga, H. A satellite study of the atmospheric forcing and response to moist convection over tropical and subtropical oceans / H. Masunaga // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 1. – p. 150-167.
5. Arakawa, A. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part 1 / A. Arakawa, C. Su // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2013. – vol. 70, is. 7. – p. 1972-1992.
6. An evaluation of WRF simulations of clouds over the Southern Ocean with A-Train observation / Y. Huang [et al.] // *Monthly Weather Review*. – 2014. – vol. 142, is. 2. – p. 647-667.
7. Holton, J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology (4th edition) / J.R. Holton – Oxford: Elsevier Academic Press, 2004. – 535 p.
8. Dias, J. An object-based approach to assessing the organization of tropical convection / J. Dias, S.N. Tulich, G.N. Kiladis // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 8. – p. 2488-2504.
9. Application of lightning data assimilation technique in the WRF-ARW model at cloud-resolving scales for the tornado outbreak at 24 May 2011 / A. O. Fierro [et al.] // *Monthly Weather Review*. – 2012. – vol. 140, is. 8. – p. 2609-2627.
10. Rojers, R.E. Application of the Weather Research and Forecast model air quality modeling in the San Francisco bay area / R.E. Rojers [et al.] // *Journal of Applied Meteorology and climatilogy*. – 2013. – vol. 52, is. 9. – p. 1953-1973.
11. CAPE in tropical cyclones / J. Molinari [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 8. – p. 2452-2463.
12. Development of a probabilistic convective weather forecast threshold parameter for flight-routing decisions / K. Sheth [et al.] // *Weather and Forecasting*. – 2013. – vol. 28, is. 5. – p. 1175-1187.
13. Fletcher N.H. Effect of electric charge on collisions between droplets. / N.H. Fletcher // *Journal of Applied Meteorology and climatilogy*. – 2012. – vol. 52, is. 2. – p. 517-520.

14. Sonnenfeld, R.G. Electric field reversal on sprite electric field signature / R.G. Sonnenfeld, W.W. Hager // *Monthly Weather Review*. – 2013. – vol. 141, is. 5. – p. 1731-1735.
15. Lock N.A. Empirical examination of the factors regulating thunderstorm initiation / N.A. Lock, A.L. Houston // *Monthly Weather Review*. – 2014. – vol. 142, is. 1. – p. 240-258.
16. Evaluation of a cloud-scale lightning data assimilation technique and a 3DVAR method for the analysis and short-term forecast of the 29 June 2012 derecho event / A.O. Fierro [et al.] // *Monthly Weather Review*. – 2014. – vol. 142, is. 1. – p. 183-202.
17. Evolution of lightning activity and storm charge relative to dual-Doppler analysis of a high-precipitation supercell storm / K.M. Calhoun [et al.] // *Monthly Weather Review*. – 2013. – vol. 141, is. 7. – p. 2199-2223.
18. Zhang, H. Examination of errors in near-surface temperature and wind from WRF numerical simulations in regions of complex terrain / H. Zhang, Zh. Pu, X. Zhang // *Weather and Forecasting*. – 2013. – vol. 28, is. 3. – p. 893-914.
19. Kingston, M.R. Freezing of raindrops in deep convective updrafts. A microphysical and polarimetric model / M.R. Kingston, S.M. Ganston, A.V. Ryzhkov // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 12. – p. 3471-3490.
20. Van Weveberg, K. Impact of environmental instability on convective precipitation uncertainly associated with the nature of their rimed ice species in a bulk microphysic scheme / K. Van Weveberg // *Monthly Weather Review*. – 2013. – vol. 141, is. 8. – p. 2841-2849.
21. Influence of the subcloud layer on the development of a deep convective ensemble / S.J. Boing [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 9. – p. 2682-2698.
22. Lopez, R.E. Internal structure and development processes of c-scale aggregates of cumulus clouds / R.E. Lopez // *Monthly Weather Review*. – 1978. – vol. 106. – p. 1488-1494.
23. Trachte, K. Katabatic flows and their relation to the formation of convective clouds – idealized studies / K. Trachte, J. Bendix // *Journal of Applied Meteorology and climatology*. – 2012. – vol. 51, is. 8. – p. 1531-1546.
24. Weiss, S.A. Lightning in the anvils of supercell thunderstorms / S.A. Weiss, D.R. MacGorman, K.M. Calhoun // *Monthly Weather Review*. – 2012. – vol. 140, is. 7. – p. 2046-2079.
25. Lightning in wildfire smoke plumes observed in Colorado during summer 2012 / T.J. Long [et al.] // *Monthly Weather Review*. – 2014. – vol. 142, is. 2. – p. 489-507.
26. French, A.J. Observation of merges between squall lines and isolated supercells thunderstorms / A.J. French, M.D. Parker. // *Weather and Forecasting*. – 2012. – vol. 27, is. 2. – p. 255-278.
27. Simpson, J. On cumulus merges / J. Simpson [et al.] // *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioclimatologie*. – 1980. – vol. 29. – p.1-40.

28. Jimenez, P.A. On the ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain / P.A. Jimenez, J. Dudhia // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2013. – vol. 52, is. 7. – p. 1610-1617.
29. Roms, D.M. On the equivalence of two schemes of convective momentum transport / D.M. Roms // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 12. – p. 3491-3500.
30. Cinteneo, R.M. On the predictability of supercell thunderstorm evolution / R.M. Cinteneo, D.J. Stensund // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2013. – vol. 70, is. 7. – p. 1993-2012.
31. Kirshbaum, D.J. On thermal forced circulation over heated terrain / D.J. Kirshbaum // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2013. – vol. 70, is. 6. – p. 1690-1709.
32. Ziemer, C. Parametrization of the sedimentation of raindrops with finite maximum diameter / C. Ziemer, U. Wacker // *Monthly Weather Review*. – 2012. – vol. 140, is. 5. – p. 1589-1602.
33. Honennger, C. Preconditioning deep convection with cumulus congestus / C. Honennger, B. Stevens // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2013. – vol. 70, is. 2. – p. 448-464.
34. Predicting cloud-to-cloud and intercloud lightning in weather forecast models / B.H. Lynn [et al.] // *Weather and Forecasting*. – 2012. – vol. 27, is. 6. – p. 1470-1488.
35. van Lier-Walqui, M. Quantification of cloud microphysic parametrization uncertainty using radar reflectivity / M. van Lier-Walqui, T. Vukievic, D.J. Posselt // *Monthly Weather Review*. – 2012. – vol. 140, is.11. – p. 3442-3466.
36. Paulvis, O. Radiation impact on conditionally unstable moist convection / O. Paulvis, J. Schumacher // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2013. – vol. 70, is. 4. – p. 1187-1203.
37. Nie, J. Responses of shallow cumulus convection to large-scale temperature and moisture perturbations: a comparison of large-eddy simulation and a convective parametrization based on stochastically entraining parcel / J. Nie, Zh. Kuang // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 6. – p. 1936-1956.
38. Yano, J. Self-organized criticality and homeostasis in atmospheric convective organization / J. Yano, C. Li, M.W. Moncviel // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2012. – vol. 69, is. 12. – p. 3449-3462.
39. Sensetiveness of a squall line over Central europe in a convective Scale Ensemble / K.E. Hanley [et al.] // *Monthly Weather Review*. – 2013. – vol. 141, is. 1. – p. 112-135.
40. Bryan, G.H. Sensetivity of a simulated squall to the horizontal resolution and parametrization of microphysics / G H. Bryan, H. Morrison // *Monthly Weather Review*. – 2012. – vol. 140, is. 1. – p. 202-225.
41. Slippery thermals and the cumulus entrainment paradox / S.C. Sherwood [et al.] // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 2013. – vol. 70, is. 8. – p. 2426-2442.

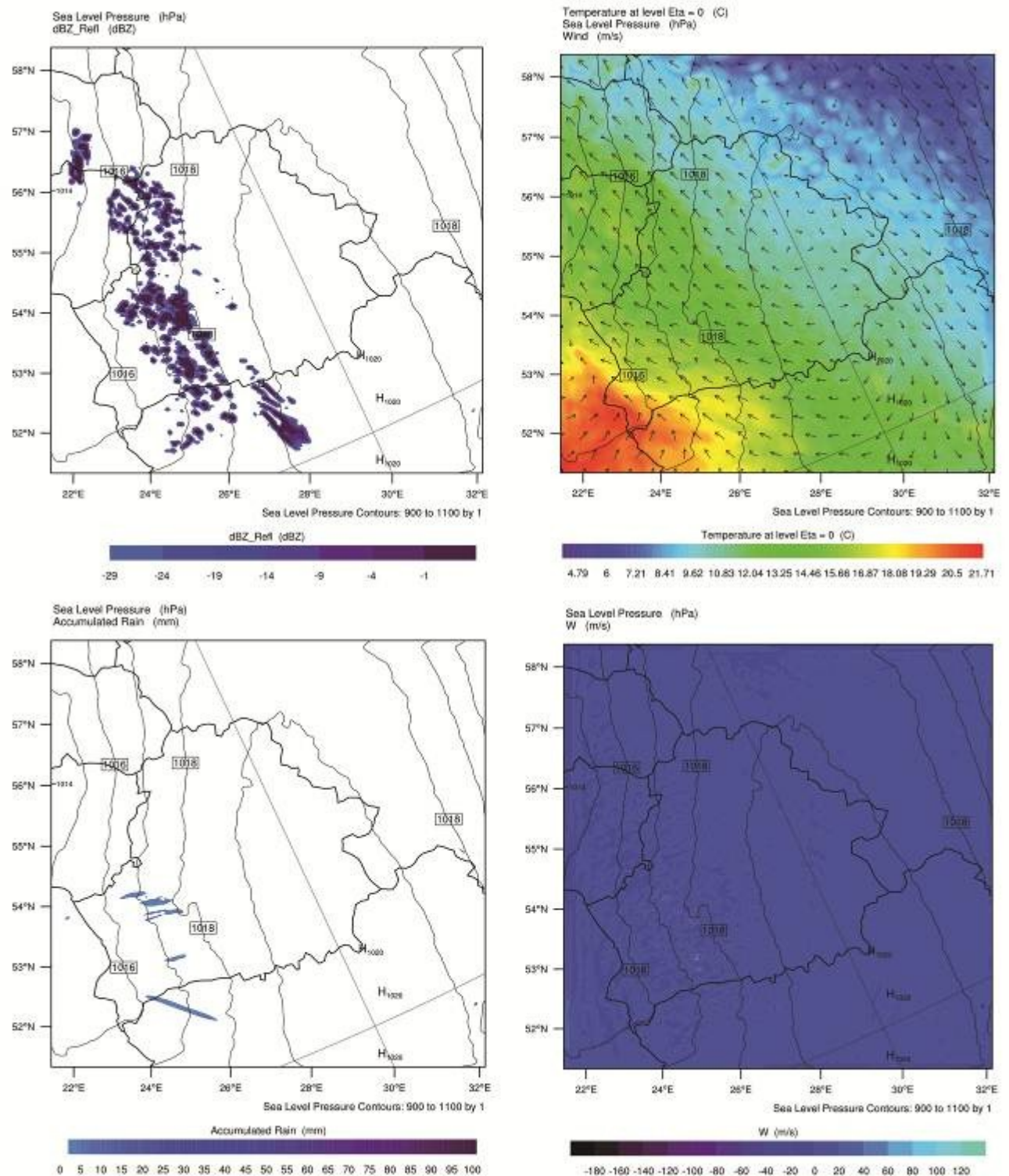
42. Stochastic behavior of tropical convection in observations and a multcloud model / K. Peters [et al.] // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2013. – vol. 70, is. 11. – p. 3556-3575.
43. Supersaturation and diffusional droplet growth in liquid clouds / M. Pinsky [et al.] // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2013. – vol. 70, is. 9. – p. 2778-2793.
44. Lee, B.D. The 19 april 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation / B.D. Lee, B.F. Jewlett and R.B. Wilhemson // Weather and Forecasting. – 2006. – vol, 21. – p. 433-446.
45. Duda, J.H. The impact of large-scale forcing on skill of simulated convective initiation and upscale evolution with convection-allowing grid spacing in the WRF / J.H. Duda, W.A. Gallus Jr. // Weather and Forecasting. – 2013. – vol. 28, is. 4. – p. 994-1018.
46. Cooper, W.A. The influence of entrainment and mixing of the initial formtion of rain in a warm cumulus cloud / W.A .Cooper, S.G. Lasher-Trapp, A.M. Blyth // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2013. – vol. 70, is. 5. – p. 1423-1436.
47. Nuijens, L. The influence of wind speed on shallow marine cumulus convection / L. Nuijens, B. Stevens // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2012. – vol. 69, is. 1. – p. 168-184.
48. Bruning, E.C. Theory and observations of controls of lightning flash size spectra / E.C. Bruning, D.R. MacGorman // Journal of the Atnospheric Sciences. – 2013. – vol. 70, is.12. – p. 4012-4029.
49. Total lightning characterictics relative to radar and satellite observations of Oklahoma mesoscale convective systems / J.A. Makowski [et al.] // Monthly Weather Review. – 2013. – vol. 141, is. 5. – p. 1593-1611.
50. Soich, K. Upper-troposphere MM5 and WRF temperature error and vertical velocity coupling / K.Soich, B. Rappengmeck // Journal of Applied Meteorology and Climatilogy. – 2013. – vol. 52, is. 5. – p. 1237-1252.
51. Чалмерс, Дж. Атмосферное электричество / Дж. Чалмерс – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1974. – 421 с.
52. Горбаренко, Е.В. Вариации радиационного баланса подстилающей поверхности по многолетним наблюдениям метеорологической обсерватории МГУ / Е.В. Горбаренко, Г.М. Абакумова // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №6. – с. 42-54.
53. Смирнов, В.В. Взаимосвязь вариаций концентраций ядер конденсации и облачного спектра / В.В. Смирнов // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №3. – с. 20-35.
54. Муравьёв, А.В. Взаимосвязь суммарных осадков над Евразией центрами действия атмосферы Северного полушария и главными модами изменчивости температуры поверхности Атлантики / А.В. Муравьёв, И.А. Куликова // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №5. – с. 5-16.
55. Вопросы атмосферного электричества: сб. науч. ст. / Гидрометеоиздат – Ленинград, 1990 – 185 с.

56. Бухаров, М.В. Диагноз вероятности гроз по спутниковой информации / М.В. Бухаров // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №8. – с. 5-16.
57. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF / Н.А. Калинин [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №9. – с. 21-30.
58. Стекольников, И.С. Изучение молнии и грозозащита / И.С. Стекольников – Москва: Издательство Академии Наук СССР, 1955. – 160 с.
59. Похил, А.Э. Исследование взаимодействия тропических циклонов и струйных течений по данным расчётов на численных моделях / А.Э. Похил, Е.С. Глебова, А.В. Смирнов // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №3. – с. 5-16.
60. Исследование ливневой и грозовой активности на территории России с использованием численной модели конвективного облака и данных реанализа / Н.Е. Веремей [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №1. – с. 32-43.
61. Исследование характеристик кучево-дождевых облаков большой мощности после воздействий с целью увеличения количества осадков / А.А. Синькевич [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №9. – с. 5-20.
62. Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развившегося над Аравийским полуостровом в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 1. Натурные наблюдения и численное моделирование / Т.В. Краус [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №2. – с. 44-59.
63. Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развившегося над Аравийским полуостровом в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 2. Анализ данных спутника Meteosat / Т.В. Краус [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №3. – с. 36-47.
64. Вельтищев, Н.Ф. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF / Н.Ф. Вельтищев, В.Д. Жупанов, Ю.Б. Павлюков // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №1. – с. 5-18.
65. Калинин, Е.Д. Метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодный период года / Е.Д. Калинин, С.В. Макогонов // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №4. – с. 19-28.
66. Иванова, А.Р. Наклон тропопаузы как характеристика её деформации / А.Р. Иванова // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №2. – с. 17-29.
67. Нацыянальны атлас Беларусі / рэдкал.: М.У. Мясніковіч [і інш.] – Мінск: Белкартаграфія, 2002. – 292 с.
68. Шишкин, Н.С. Облака. Осадки и грозовое электричество / Н.С. Шишкин – Ленинград: Гидрометеиздат, 1964. – 403 с.
69. Мазин, И.П. Облака: строение и физика образования / И.П. Мазин, С. М. Шмидт – Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 278 с.

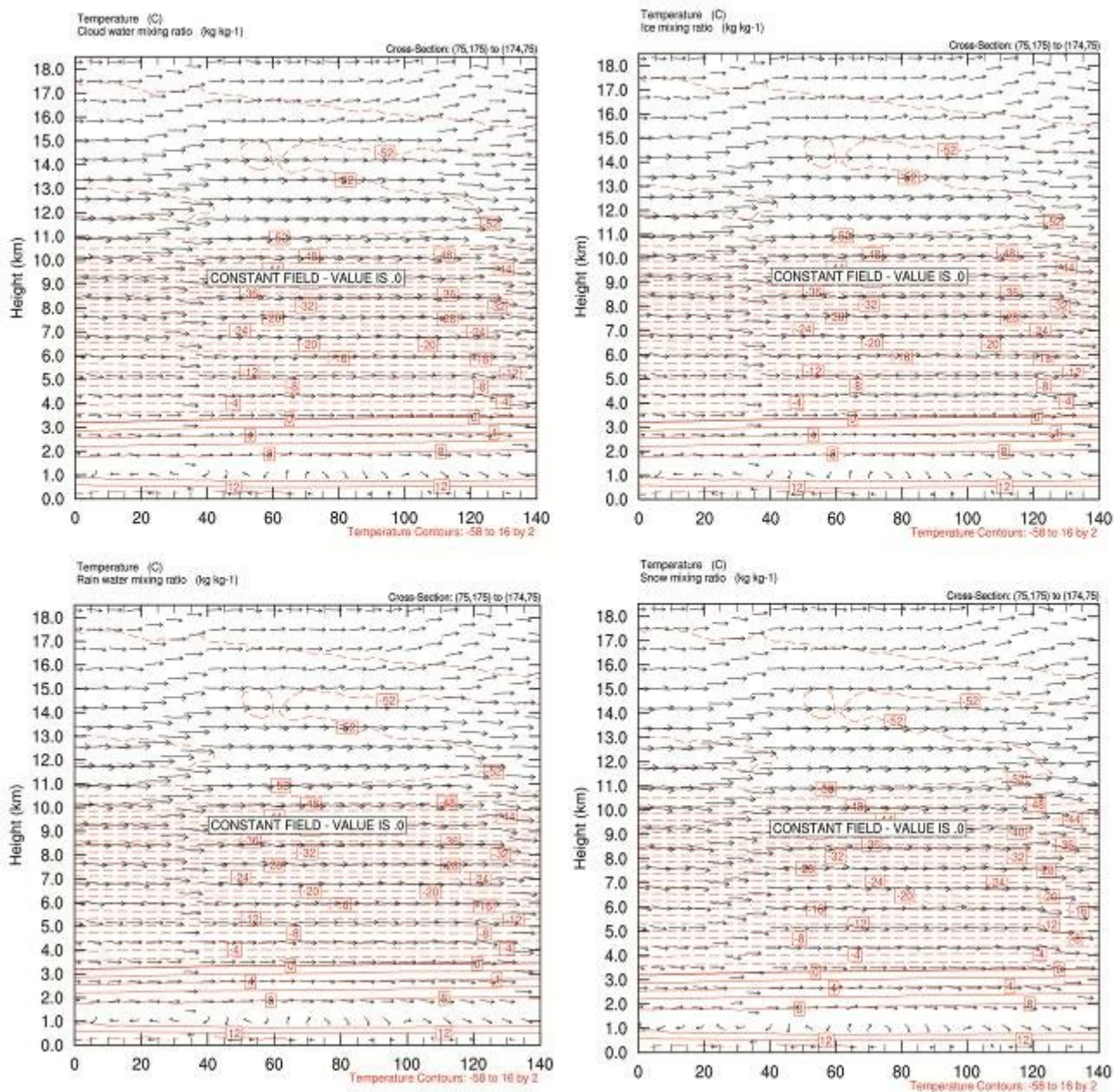
70. Калинин, Н.А. Определение водности и водозапаса кучево-дождевой облачности по информации метеорологического мониторинга / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Метеорология и Гидрология. – 2011. – №2. – с. 30-43.
71. Основы динамической метеорологии / Л.С. Гандин [и др.]; под ред. Д.Л. Лайхтмана и М.И. Юдина – Ленинград: Гидрометеиздат, 1955 – 647 с.
72. Гаврилов Н.М. Особенности аппроксимации метеорологических величин, имеющих разрывы вертикальных градиентов в области тропопаузы / Н.М. Гаврилов // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №6. – с. 24-29.
73. Природа Беларуси. Энциклопедия в 3 томах / редкол.: Т.В. Белова [и др.] – Минск: Беларуская энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2009-2014. – т. 2.
74. Лоренц, Э. Природа и теория общей циркуляции атмосферы / Э. Лоренц. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. – 257 с.
75. Прогноз эволюции конвективных штормов на основе анализа их радиоэха, годографа ветра в тропосфере в подвижной системе координат / С.Д. Плюсин [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №7. – с. 43-52.
76. Краус, Т.В. Радолокационные исследования слияния облаков / Т.В. Краус, А.А. Синькевич, А.С. Гхулам // Метеорология и Гидрология – 2012. – №9. – с. 42-57.
77. Сравнение результатов прогноза осадков на основе мезомасштабных моделей на территории Ирана в холодный период года / М. Азади [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №9. – с.31-42.
78. Давлетагиев, С.К. Статистическое моделирование месячного количества осадков одновременно в нескольких пунктах наблюдения / С.К. Давлетагиев // Метеорология и Гидрология. – 2012. – №10. – с. 16-23.
79. Шметер, С.М. Физика конвективных облаков / С.М. Шметер – Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. – 230 с.
80. Характеристика грозových ячеек по наблюдениям в Якутии / С.Н. Шабаганова [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2012. – №12. – с. 35-43.
81. Вязилова, Н.А. Циклоническая активность и последующая циркуляция в северной Атлантике / Н.А. Вязилова // Метеорология и Гидрология. – 2012. – №7. – с. 5-14.
82. Численное моделирование переноса реагентов при работах по активным воздействиям на облака / Б.П. Колосков [и др.] // Метеорология и Гидрология. – 2012. – №12. – с. 44-54.
83. Гандин, Л.С. Численные методы краткосрочного прогноза погоды / Л.С. Гандин, А.С. Дубов – Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. – 428 с.
84. Белов, П.Н. Численные методы прогноза погоды / П. Н. Белов – Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. – 391 с.
85. Дмитриева, Т.Г. Численный прогноз с мезомасштабным уточнение двух случаев особо сильных шквалов на европейской территории России

- летом 2010 года / Т.Г. Дмитриева, Б.Е. Песков // Метеорология и Гидрология. – 2013. – №2. – с. 18-30.
86. Інтэрнэт-партал праекта Giovanni. – 2014. – Рэжым доступу: . – Дата доступу: 4.04.2014.
87. Інтэрнэт-партал выдавецтва Амерыканскага Метэаралагічнага Грамадства. – 2014. – Рэжым доступу: <http://www.journals.ametsoc.org>. – Дата доступу: 12.03.2014.
88. Анлайн-інструкцыя для карыстачоў лічбавай мадэлі WRF. – 2014. – Рэжым доступу: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf>. – Дата доступу: 25.03.2014.
89. Інтэрнэт-партал сродка візуалізацыі дадзеных NCL. – 2014. – Рэжым доступу: <http://www.ncl.ucar.edu>. – Дата доступу: 9.04.2014.
90. Інтэрнэт-партал Нацыянальнага кіраўніцтва акіянічнымі і атмасфернымі даследаваннямі ЗША. – 2014. – Рэжым доступу: <http://www.noaa.gov>. – Дата доступу: 2.04.2014.
91. Анлайн-архіў дадзеных разлікаў Глобальнай Прагнастычнай Мадэлі / сродак дадзеных для лічбавых разлікаў. – 2014. – Рэжым доступу: <http://nomads.ncdc.noaa.gov/thredds>. – Дата доступу: 17.03.2014.
92. Агульнадаступны анлайн-архіў РГМЦ Беларусі. – Мінск, 2014. – Рэжым доступу: <http://www.pogoda.by/zip>. – Дата доступу: 13.03.2014.
93. Агульнадаступны анлайн архіў дадзеных назіранняў на прыземных станцыях па тэрмінам / Метэаралагічны Інтэрнэт-партал. – 2014. – Рэжым доступу: <http://www.rp5.ru>. – Дата доступу: 18.03.2014.
94. Адукацыйны Інтэрнэт-партал для навучэнцаў лічбаваму мадэляванню. – 2014. – Рэжым доступу: <http://www.ucar.edu>. – Дата доступу: 2.03.2014.
95. Інтэрнэт-энцыклапедыя. – 2014. – Рэжым доступу: <http://www.wikipedia.org>. – Дата доступу: 3.03.2014.

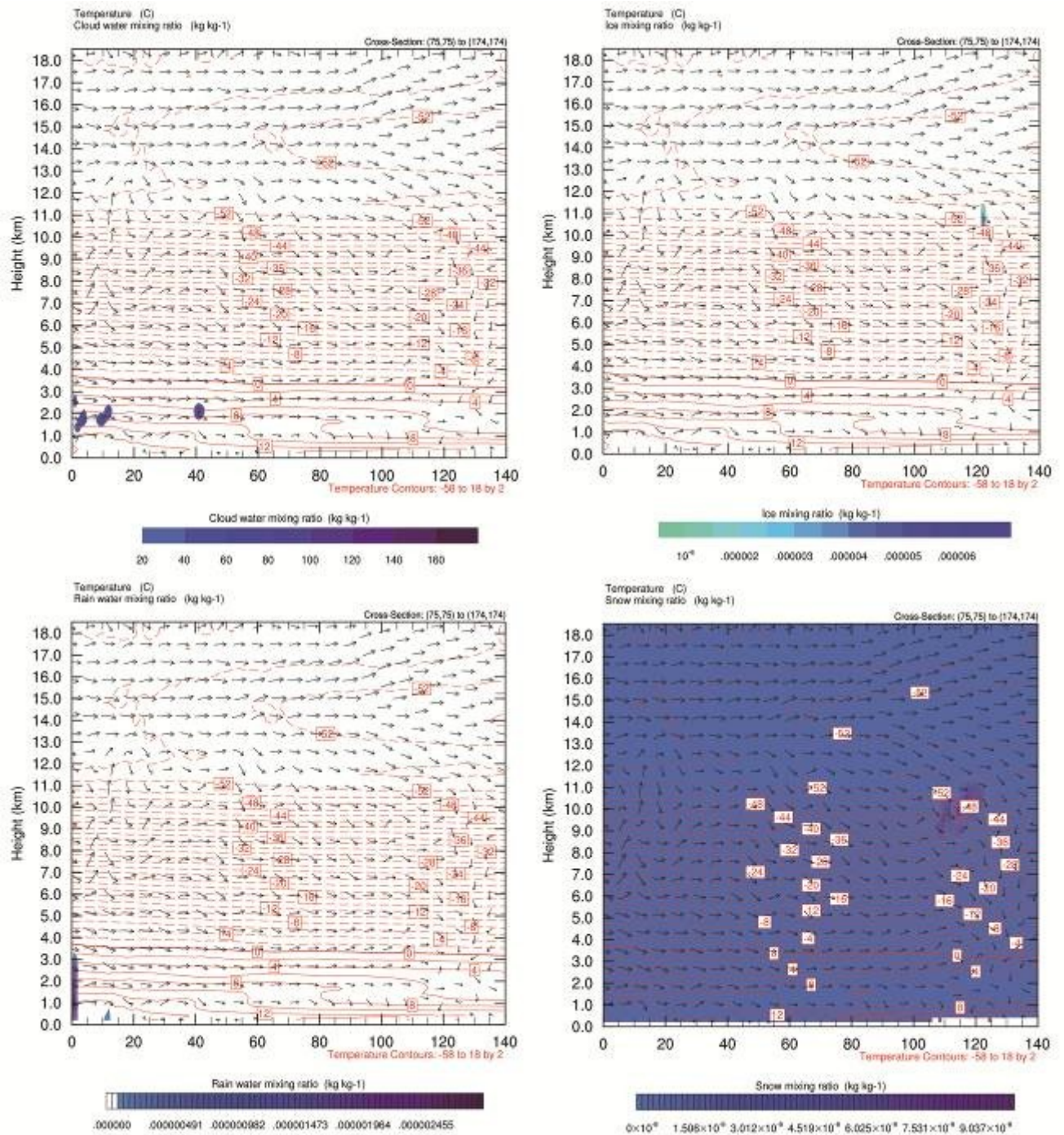
ДАДАТАК



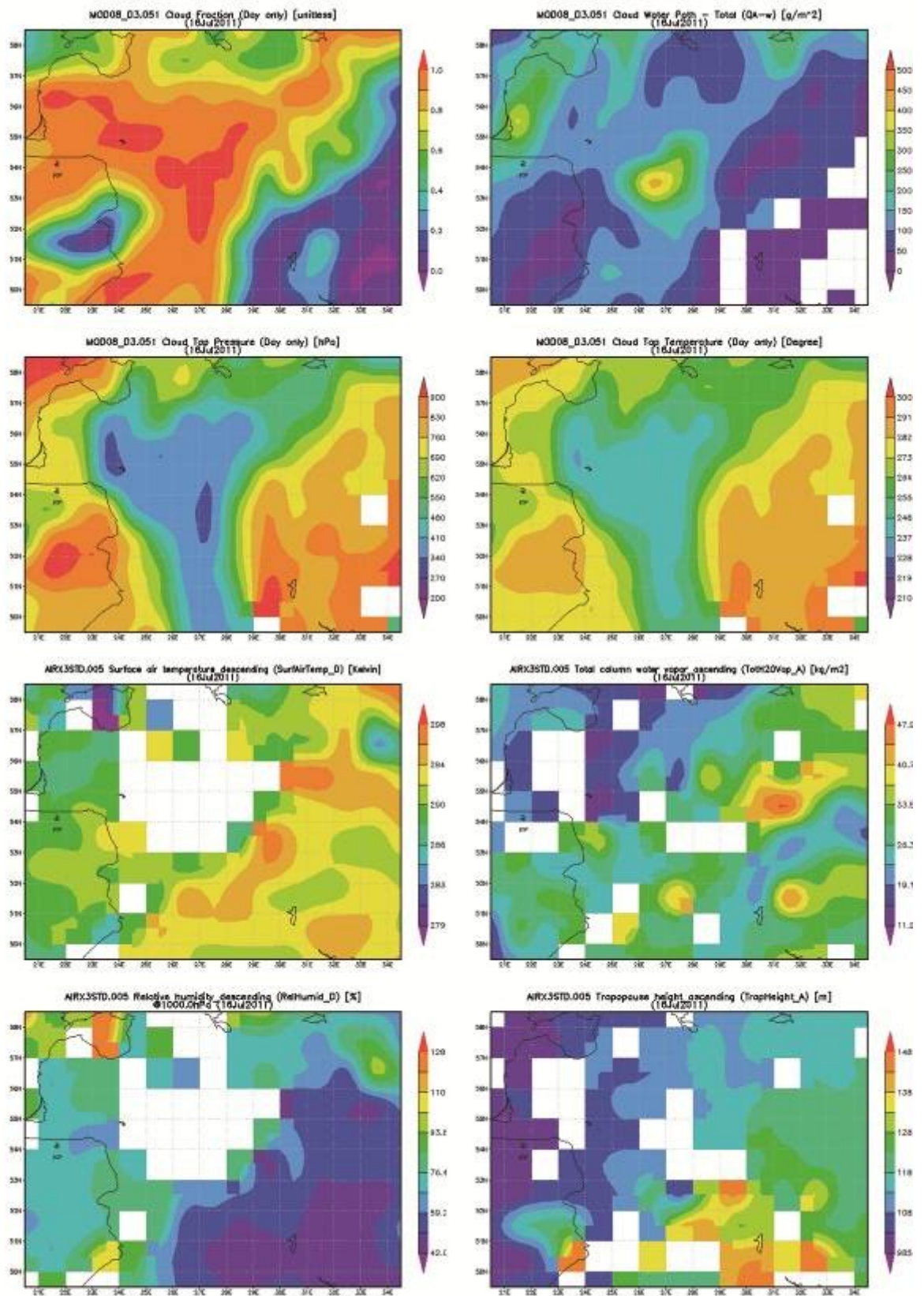
Мал. 1. Значенні показчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка навальніцы ў Клічаве



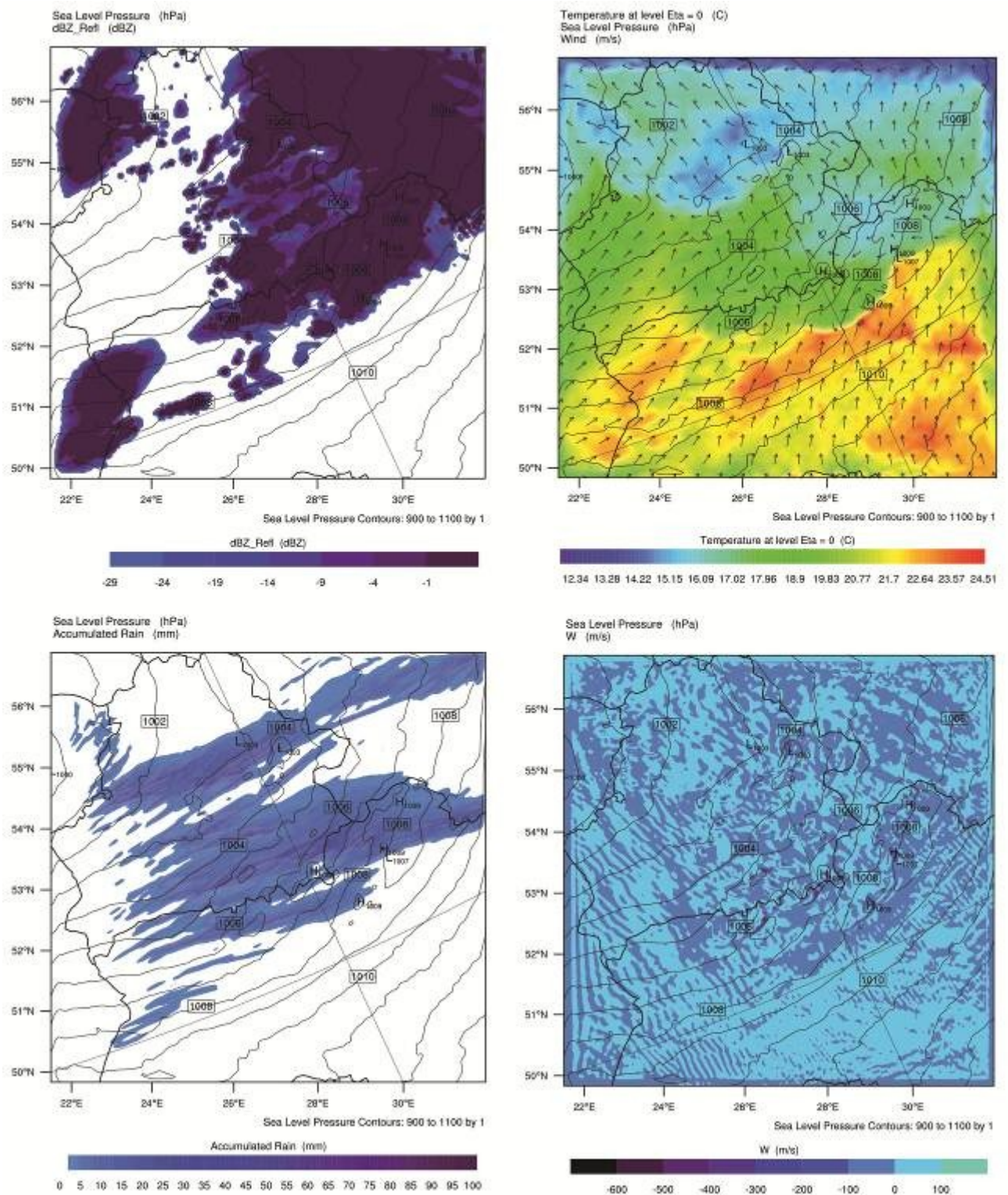
Мал. 2. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лінії паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалыніцы ў Клічаве



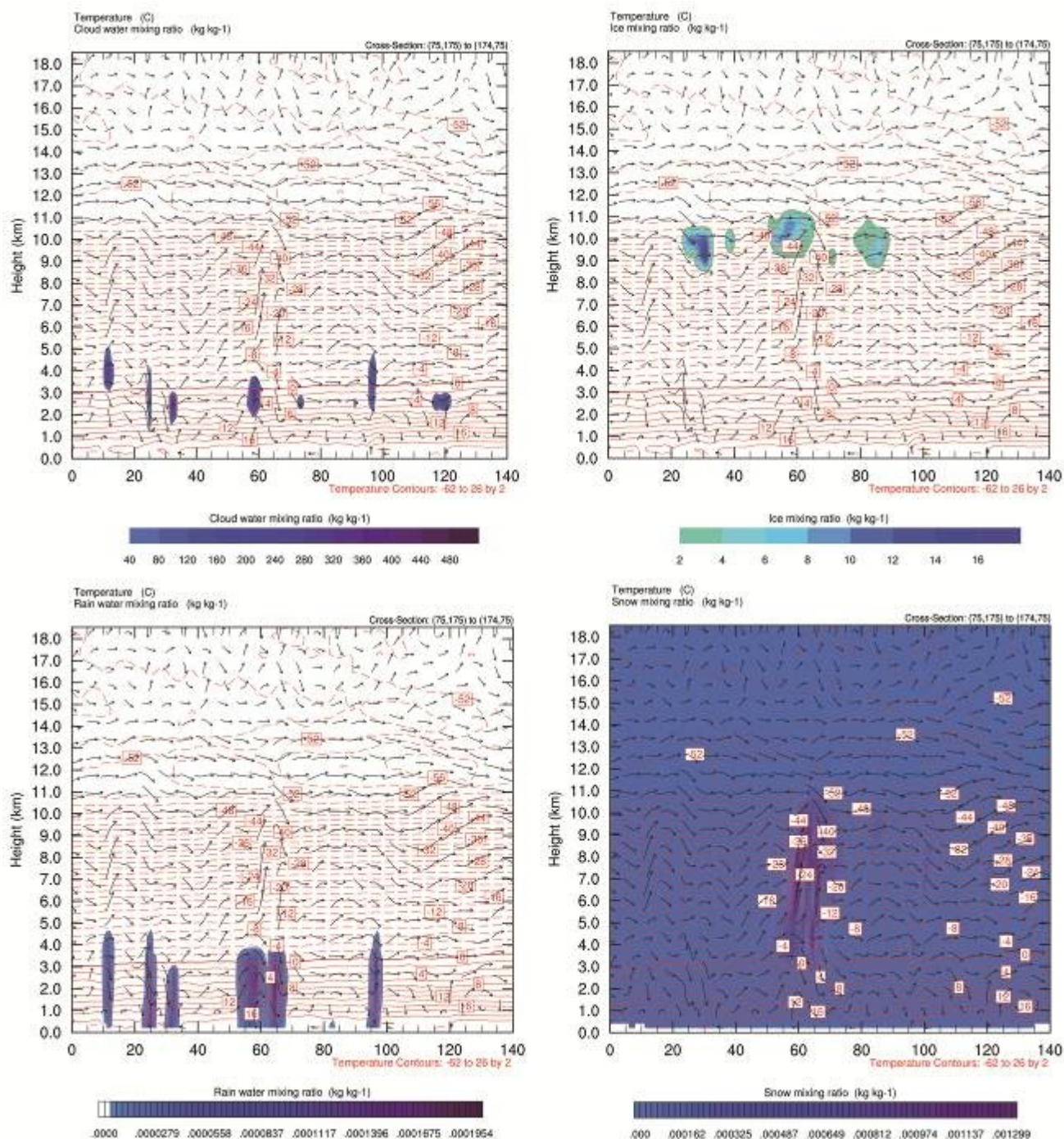
Мал. 3. Вертикальні розрізи (за значеннями співвідношень сумішей частінок хмарних і дощових крапель, ледяних кристаликів і снігу) по лінії південно захід – північно схід через центральну частину дамба для випадку навальниці в Клічеве



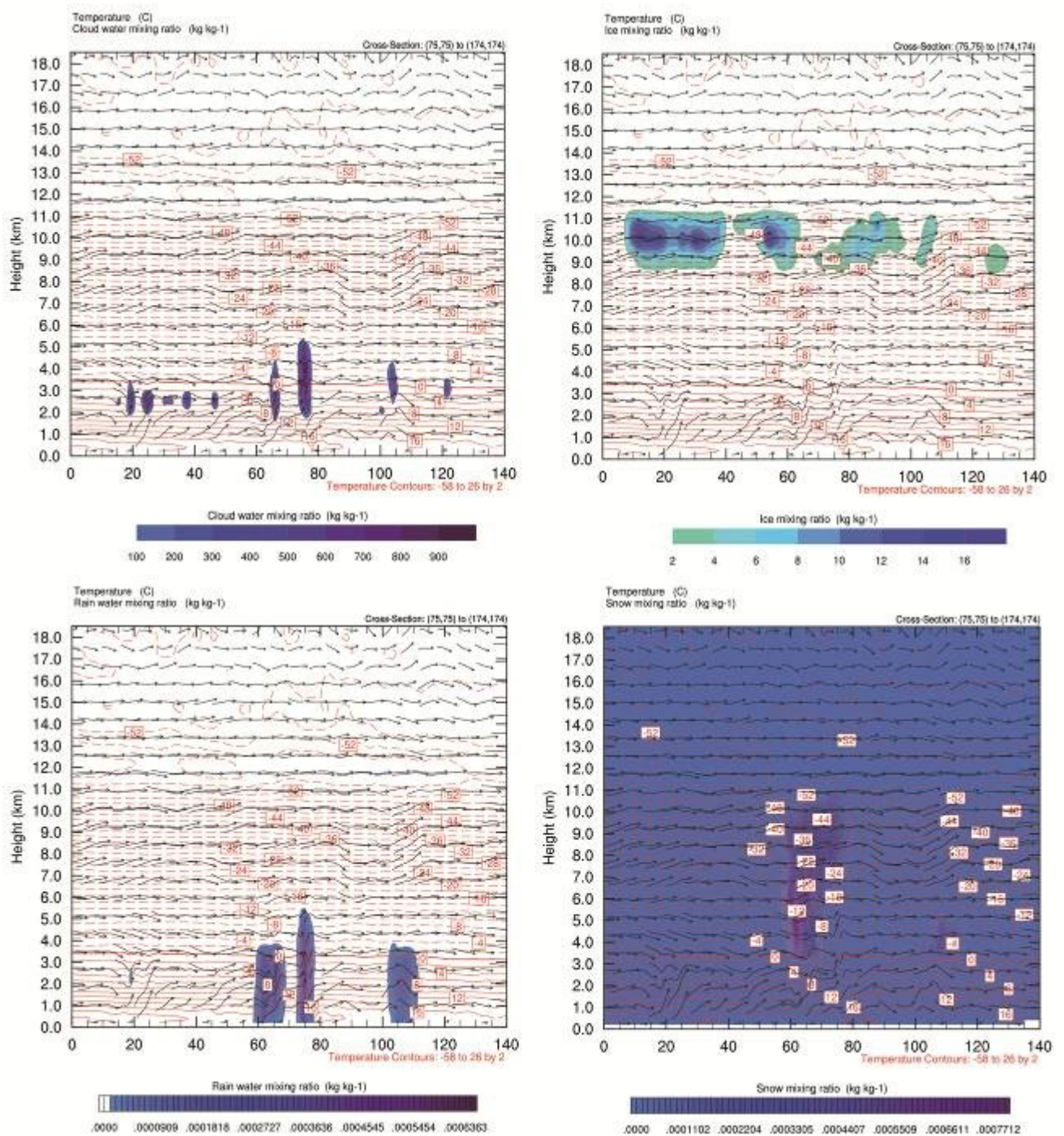
Мал. 4. Спадарожнікавыя карты для выпадка навалыніцы ў Клічаве (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў, прыземнай тэмпературы, вільгацеўтрыманню, адноснай вільготнасці і вышыні трапапаўзы)



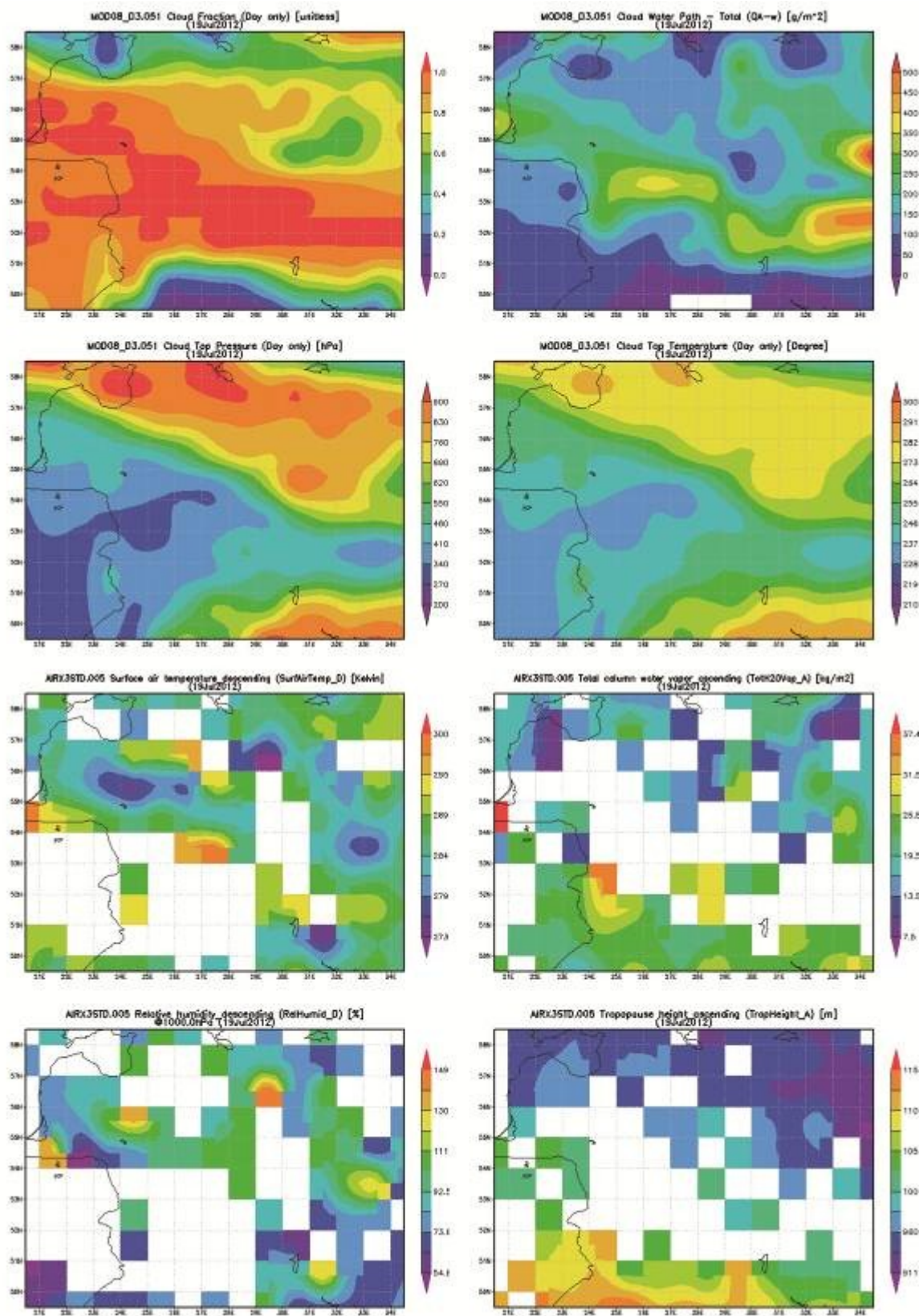
Мал. 5. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка навалніцы ў Мазыры



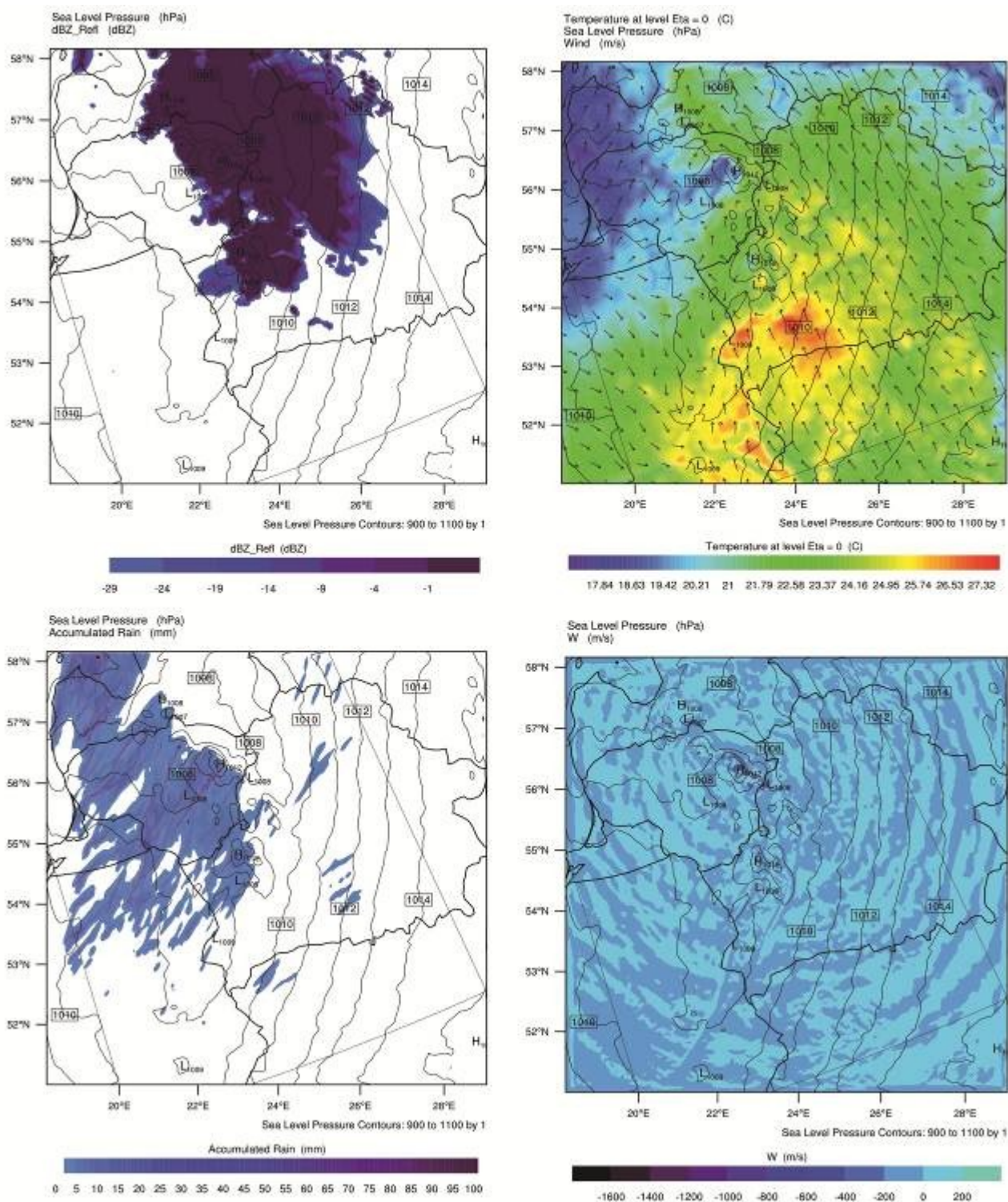
Мал. 6. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навальніцы ў Мазыры



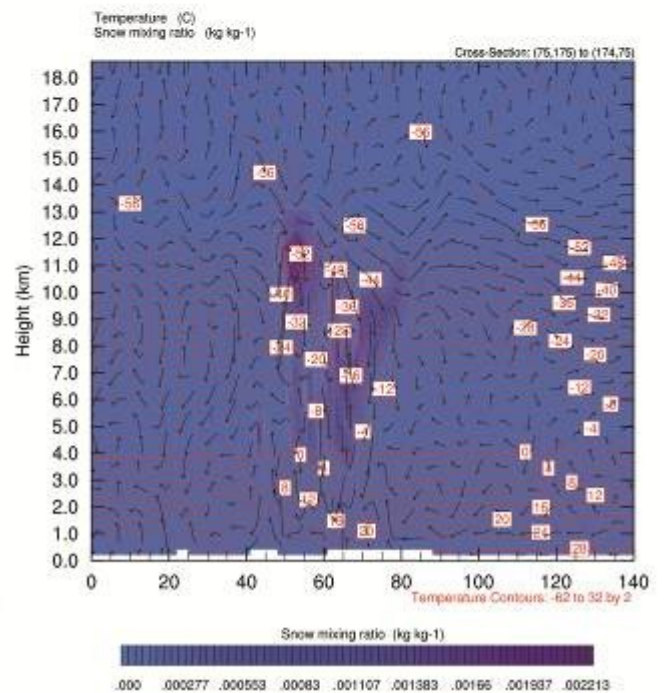
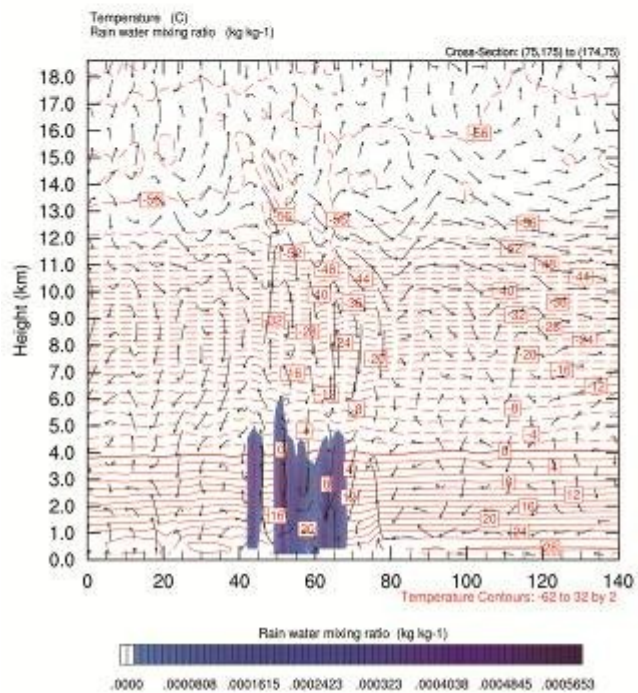
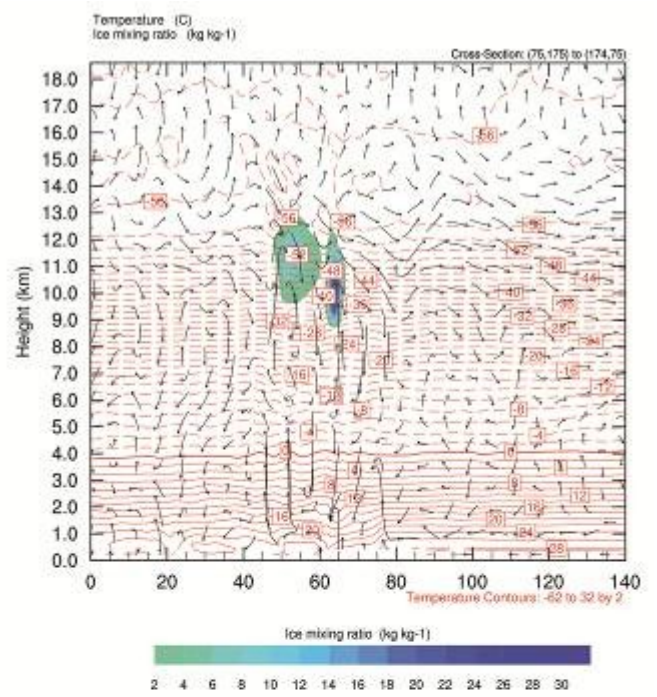
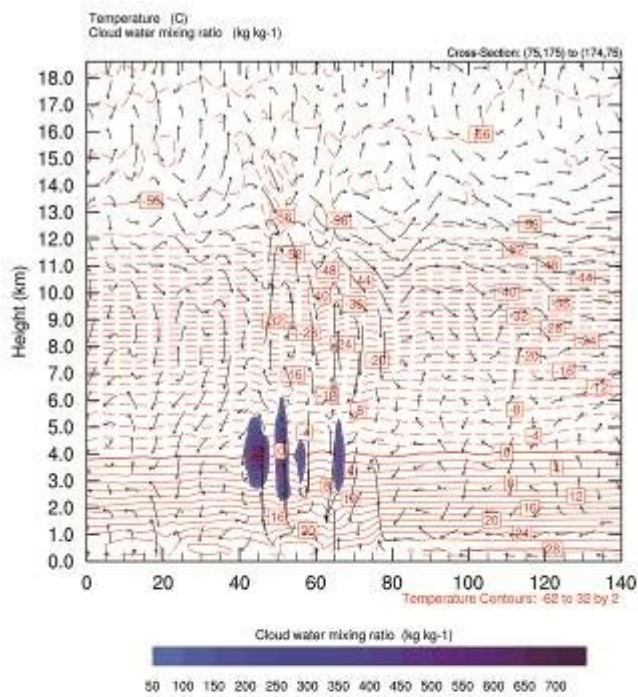
Мал. 7. Вертыкальныя разрэзы (са значэннямі суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалыніцы ў Мазыры



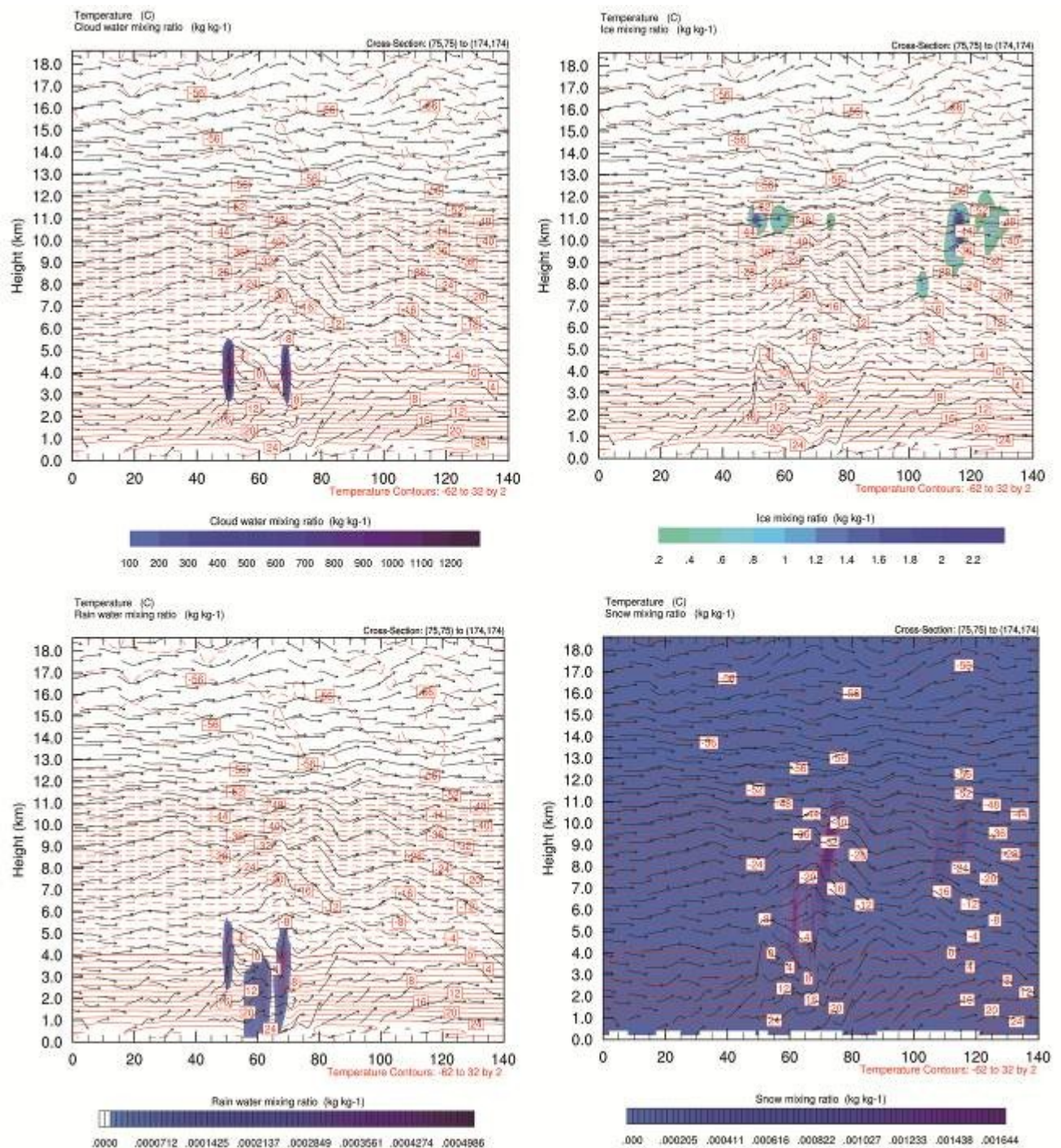
Мал. 8. Спадарожнікавыя карты для выпадка навалніцы ў Мазыры (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў, прыземнай тэмпературы, вільгацеўтрыманню, адноснай вільготнасці і вышыні трапапаўзы)



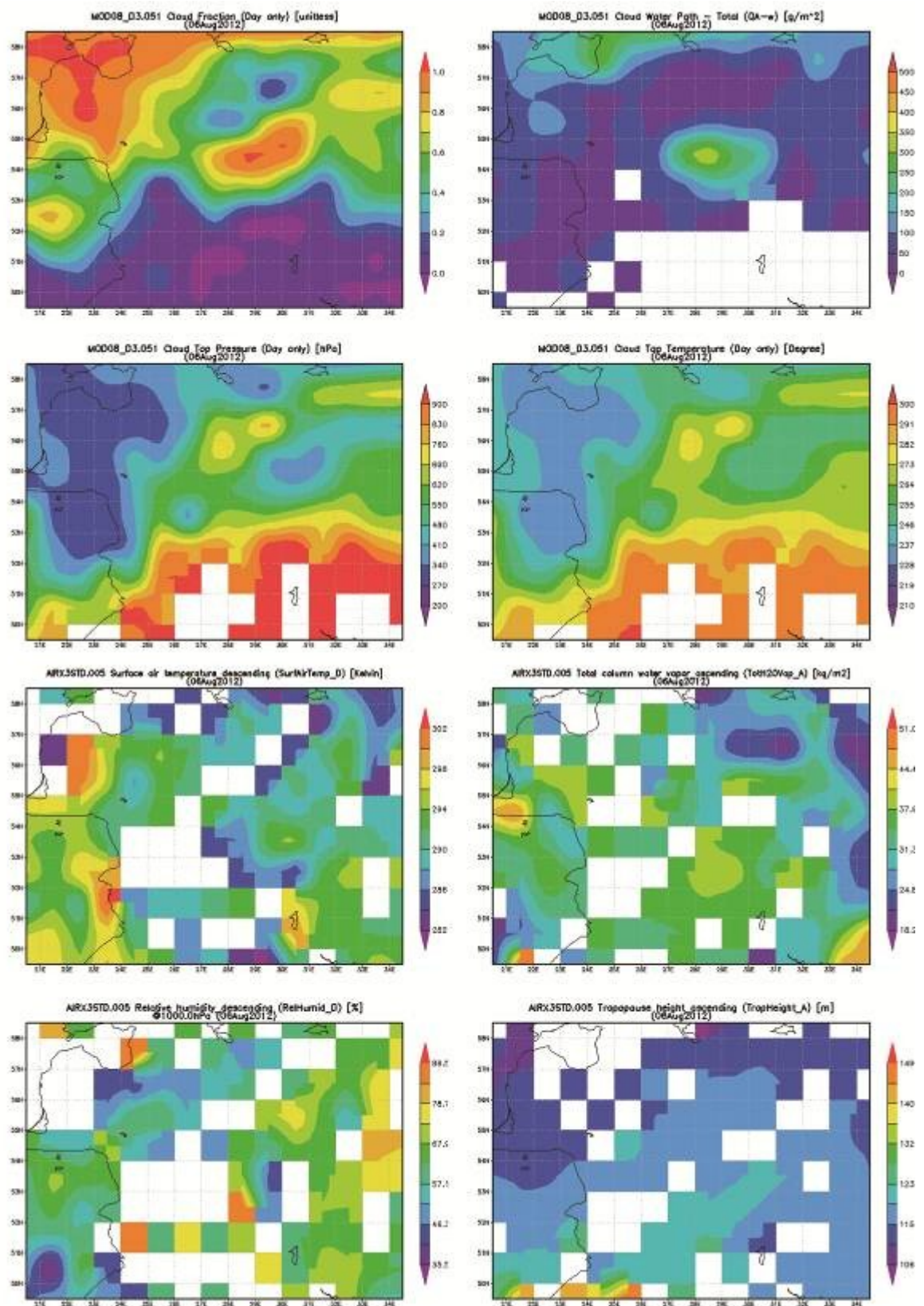
Мал. 9. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка навальніцы ў Навагрудку



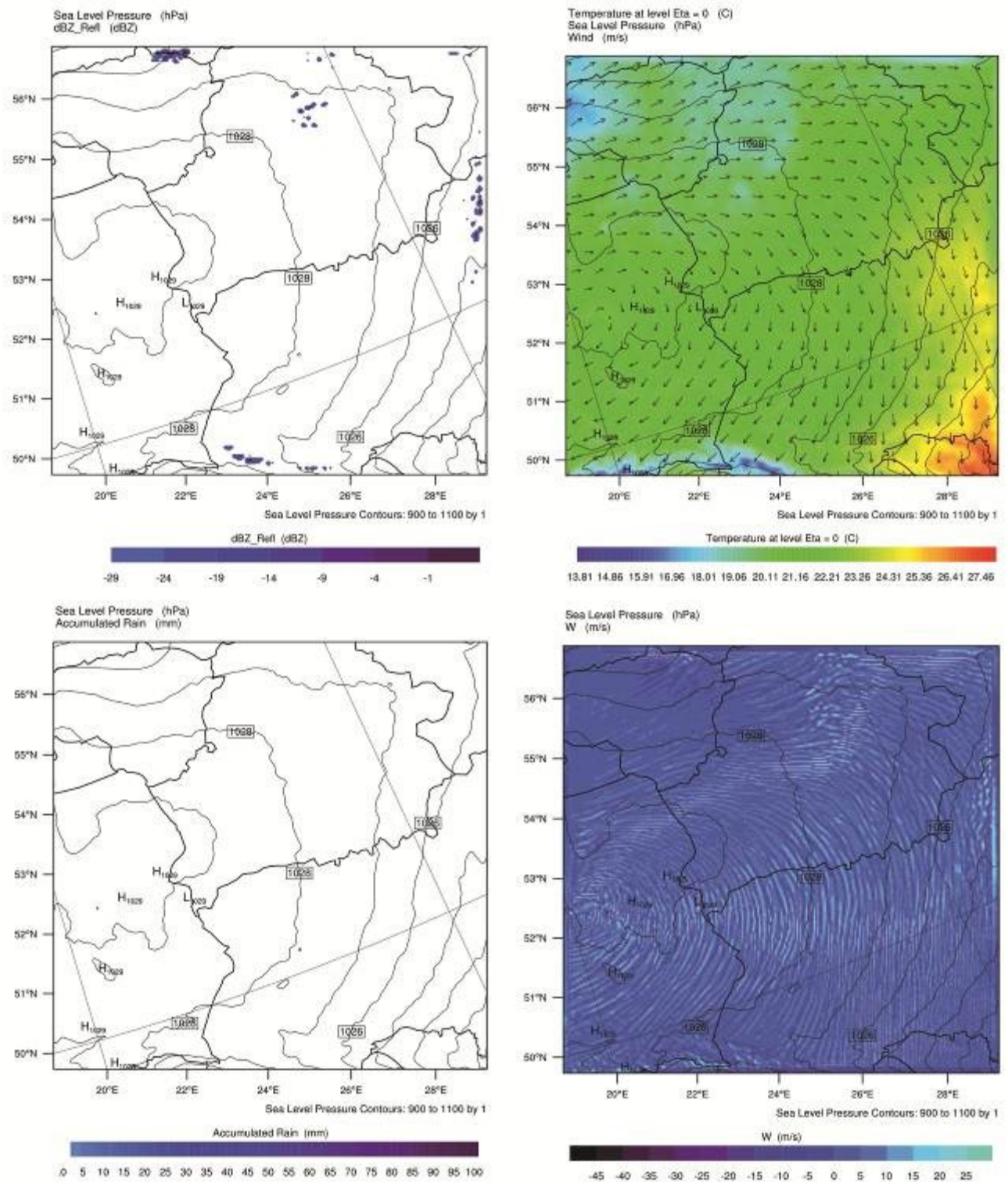
Мал. 10. Вертыкальныя разрэзы (са значэннямі суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка наваліны ў Навагрудку



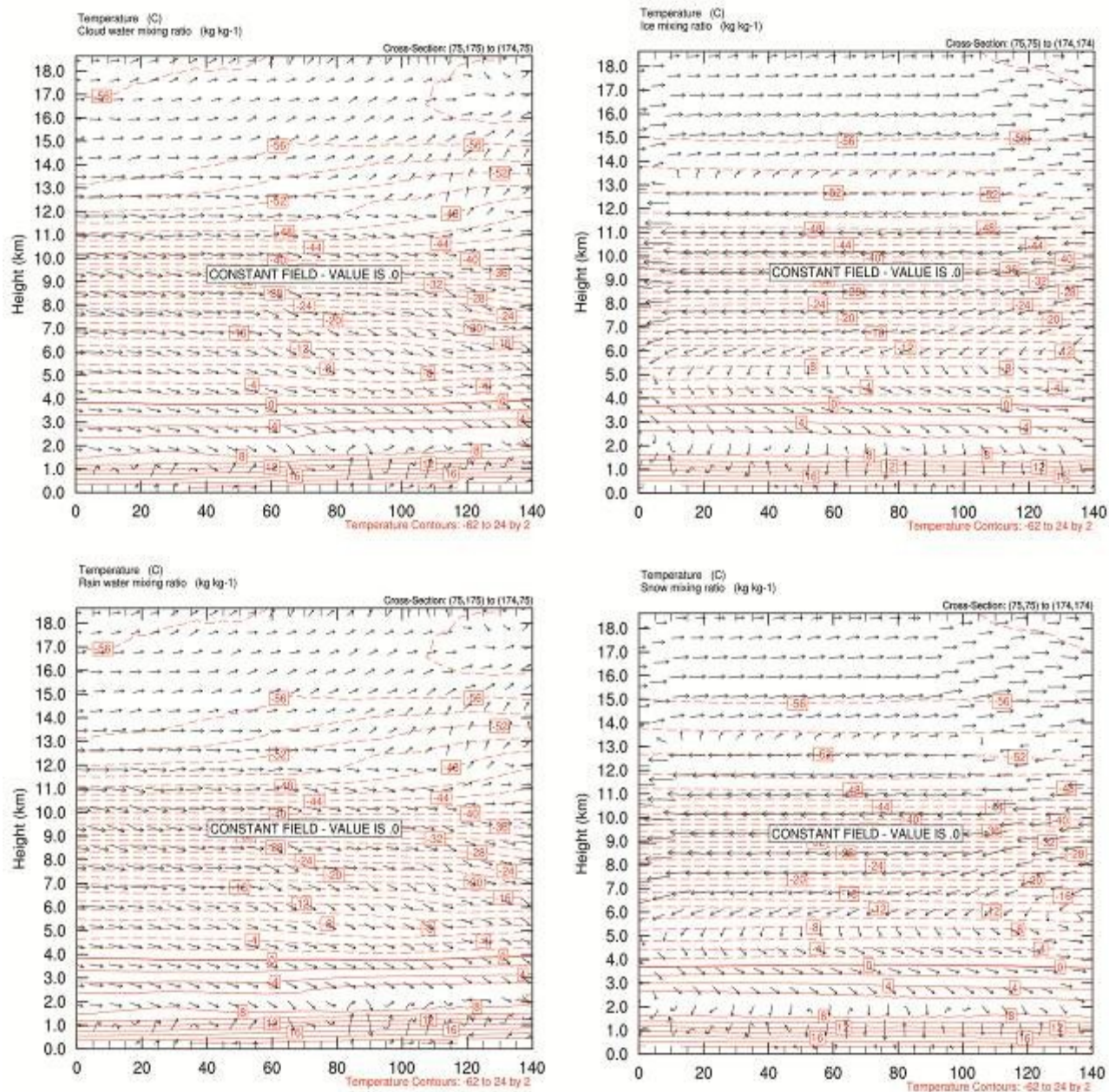
Мал. 11. Вертыкальныя разрэзы (са значэннямі суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Навагрудку



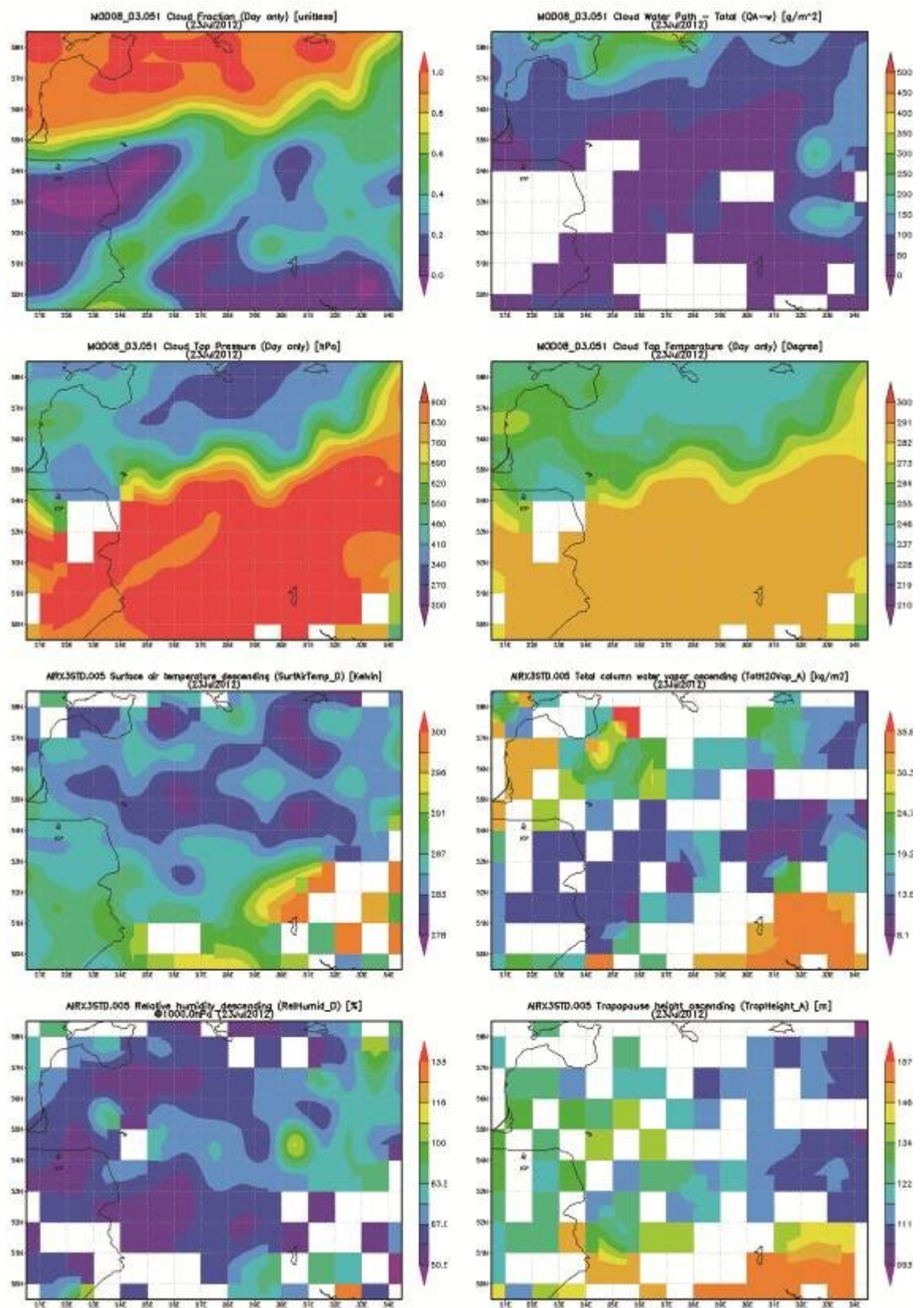
Мал. 12. Спадарожнікавыя карты для выпадка навалніцы ў Навагрудку (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў, прыземнай тэмпературы, вільгацеўтрыманню, адноснай вільготнасці і вышыні трапапаўзы)



Мал. 13. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка навалы Пінску

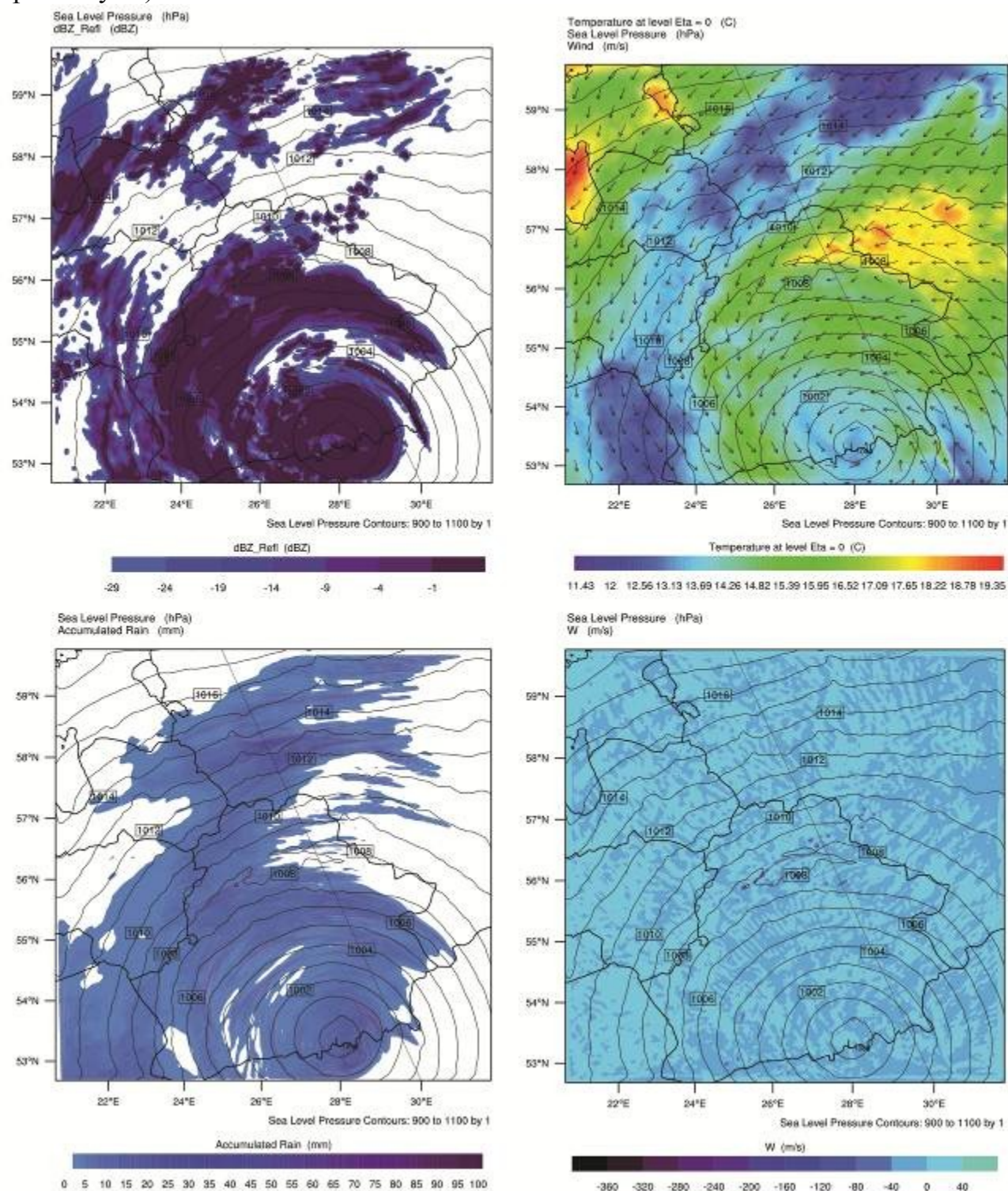


Мал. 14. Астатнія вертыкальныя разрэзы для выпадка навалыніцы ў Пінску (першая частка была прыведзена ў главе 3.7.)

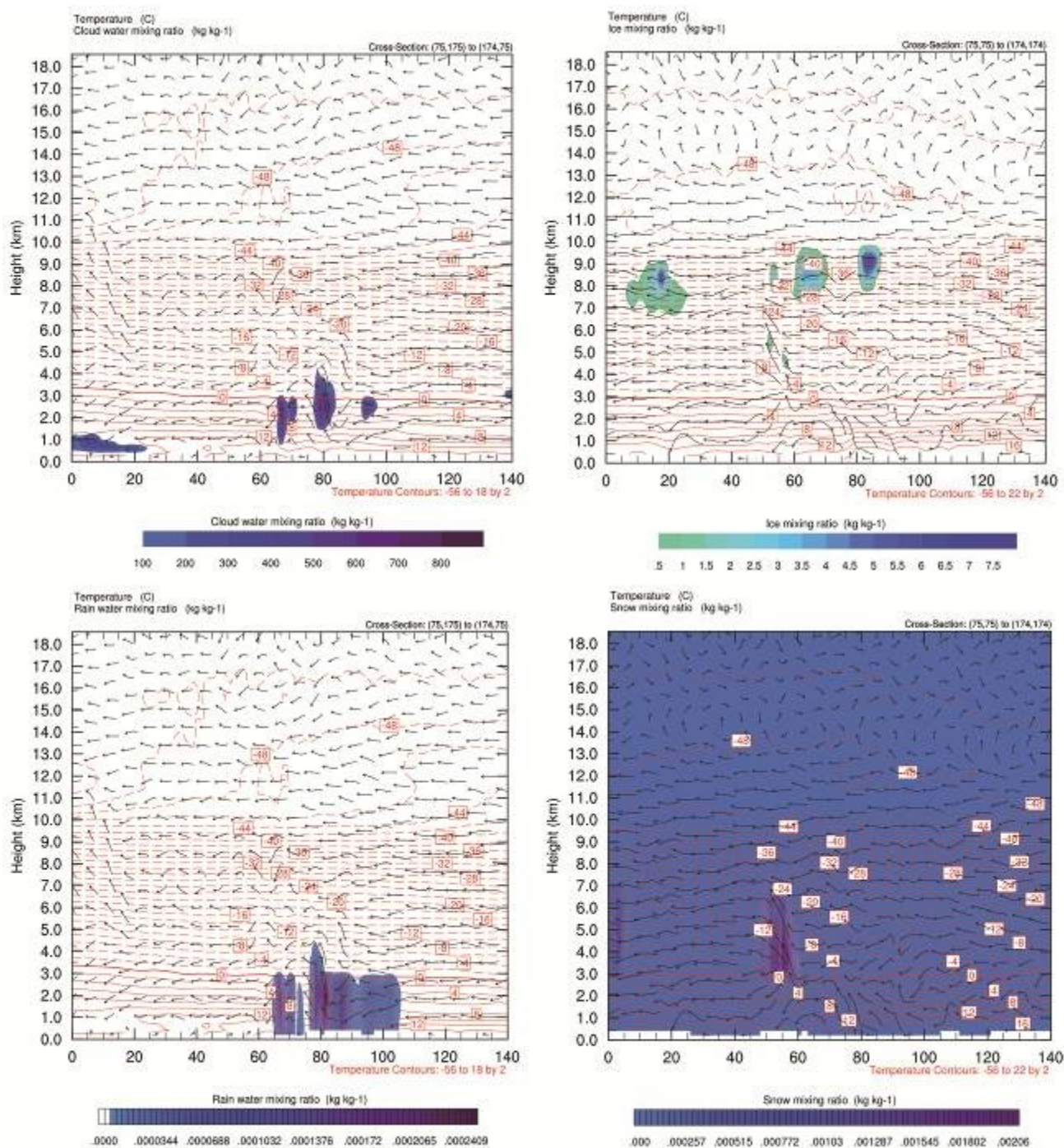


Мал. 15. Спадарожнікавыя карты для выпадка навалыніцы ў Пінску (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў,

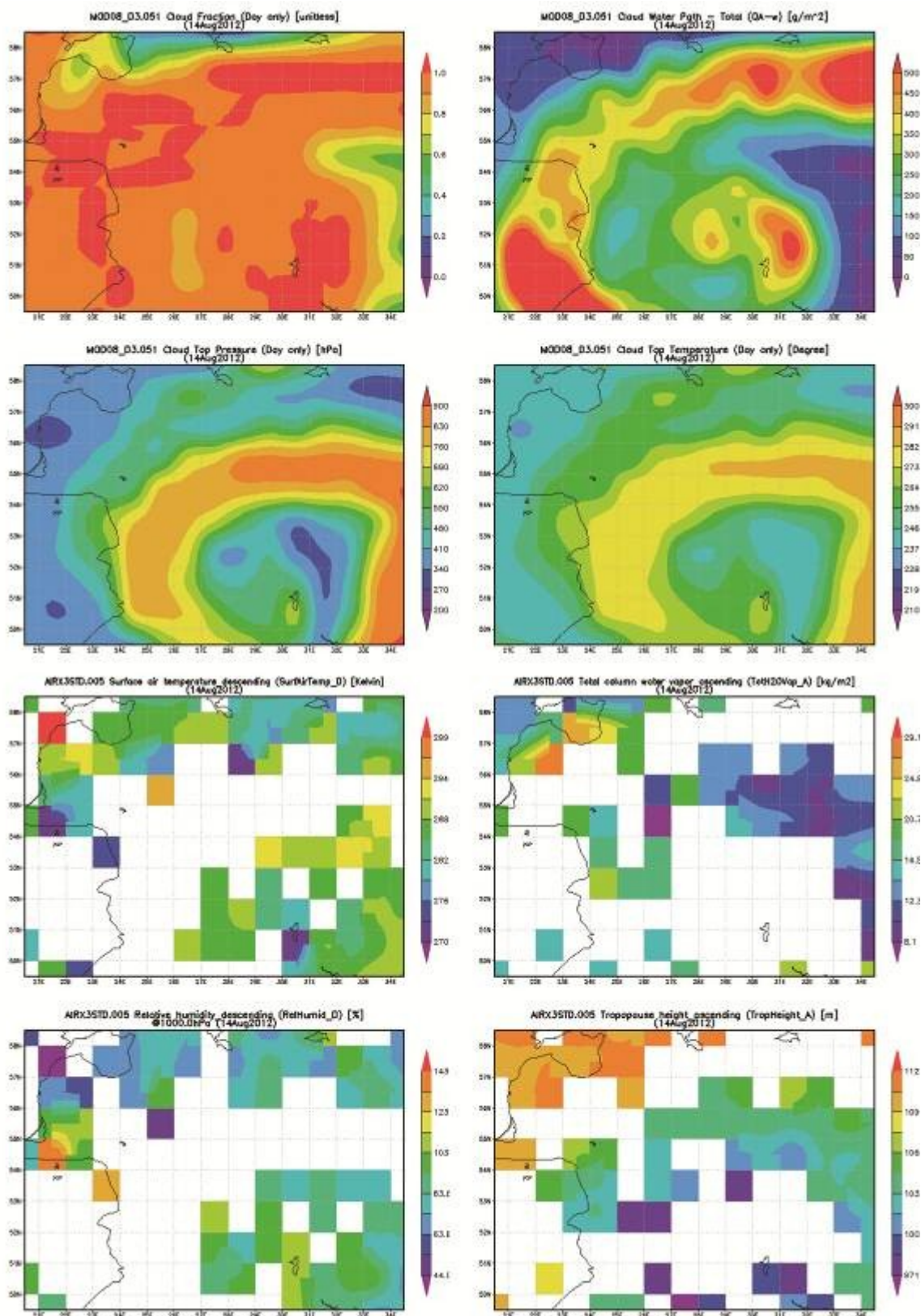
приземной температуры, вільгацеўтрыманню, адноснай вільготнасці і вышыні трапапаўзы)



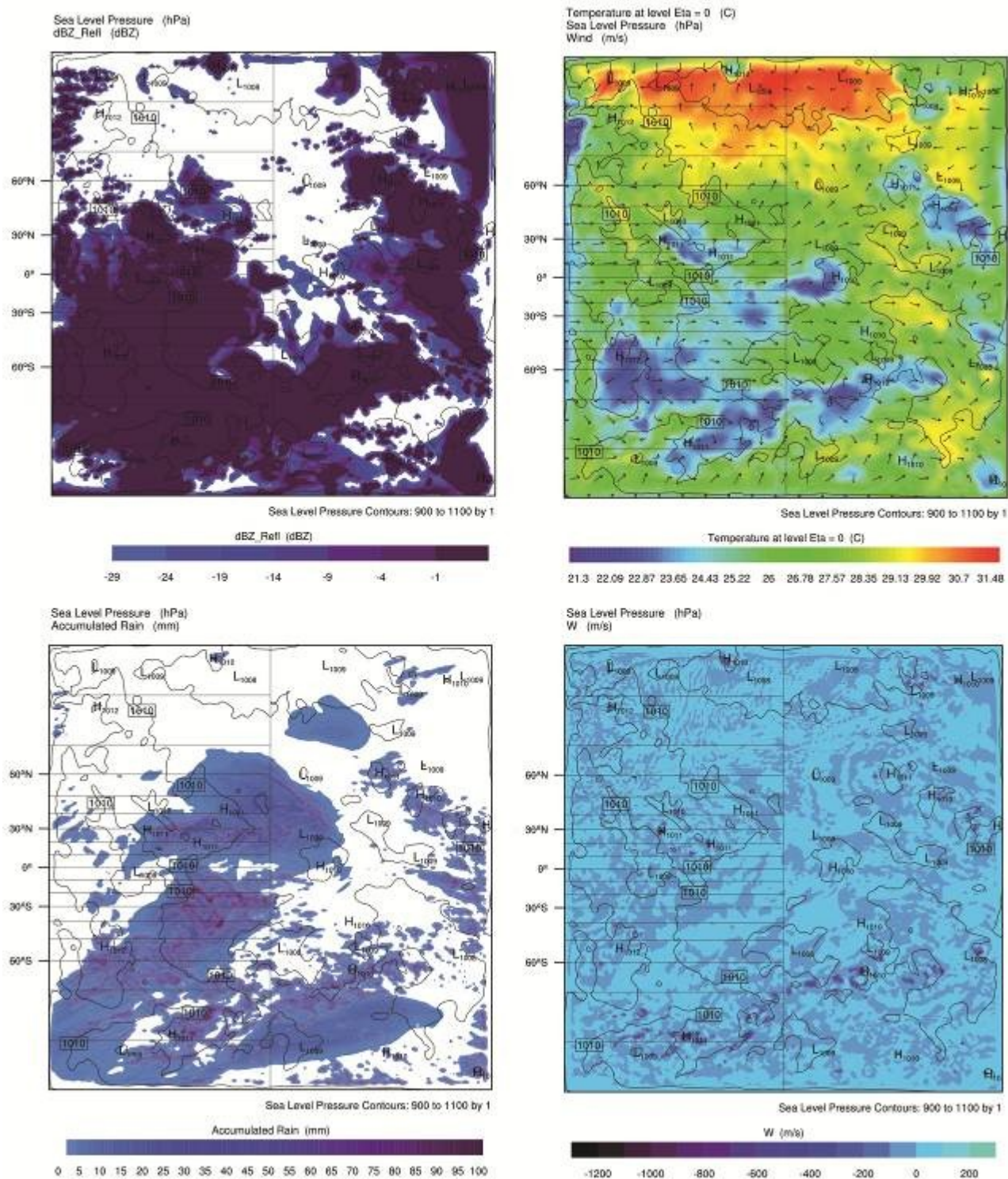
Мал. 16. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка навалы Пінску



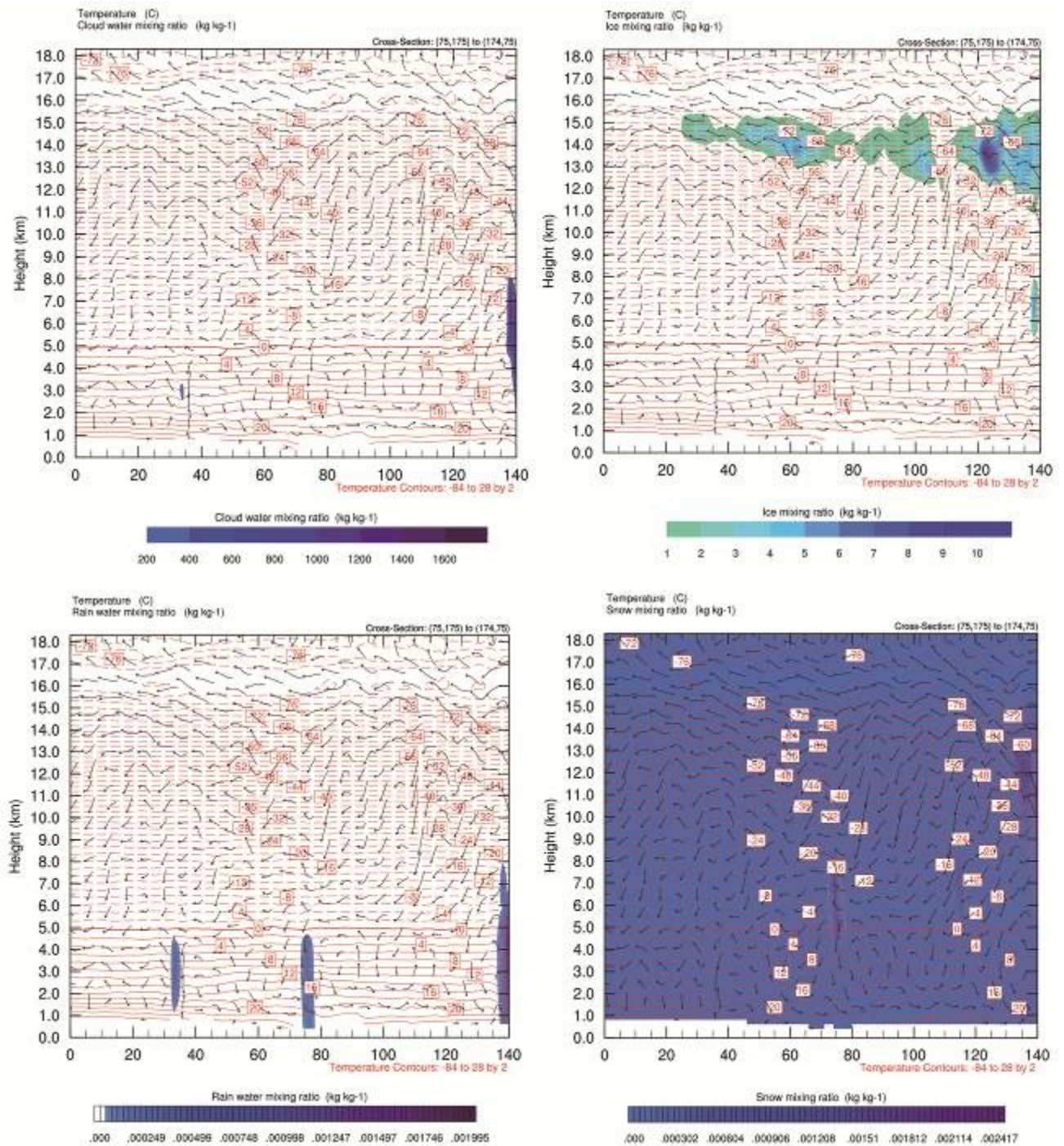
Мал. 16. Астатнія вертыкальныя разрэзы для выпадка наваліны ў Пінску (першая частка была прыведзена ў главе 3.7.)



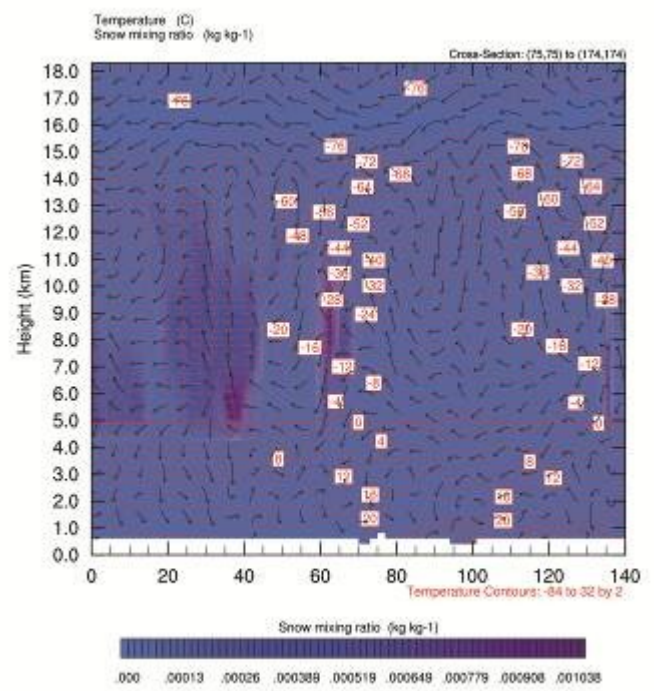
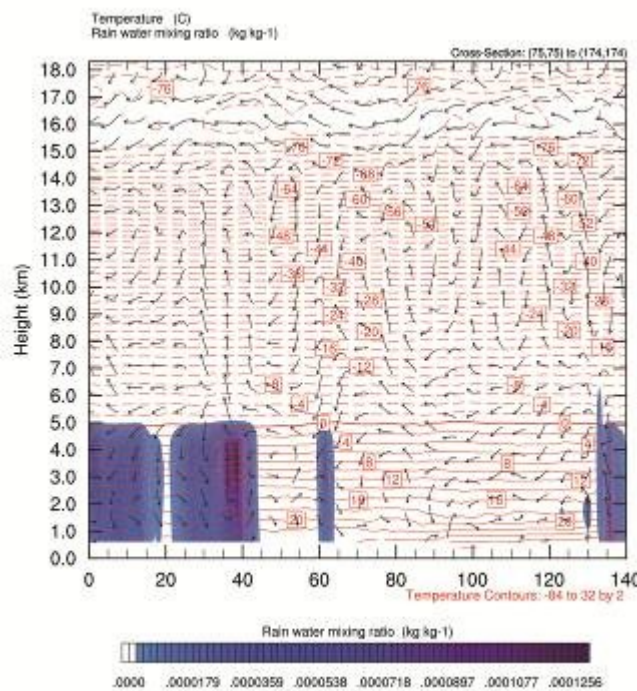
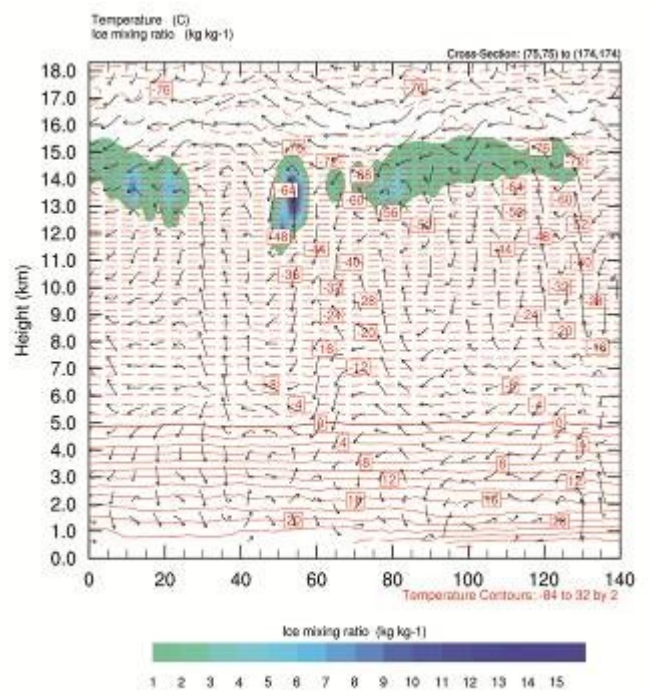
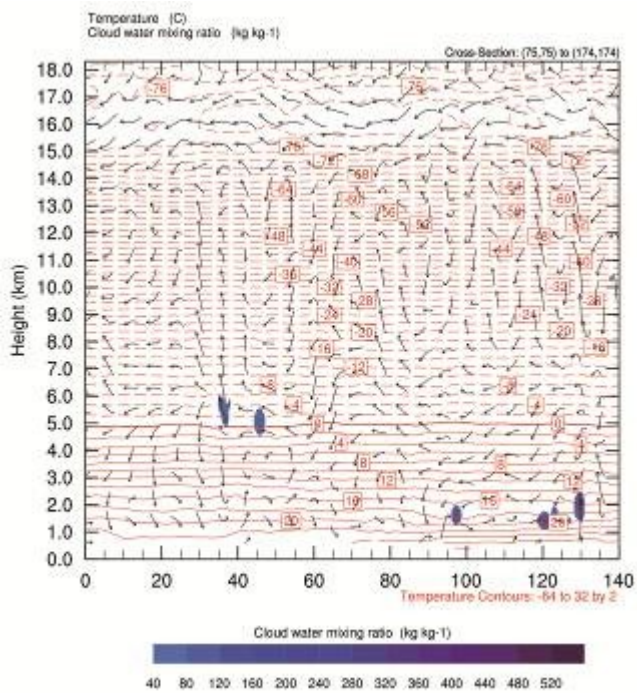
Мал. 17. Спадарожнікавыя карты для выпадка навалы ў Лепелі (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў, прыземнай тэмпературы, вільгацеўтрыманню, адноснай вільготнасці і вышыні трапапаўзы)



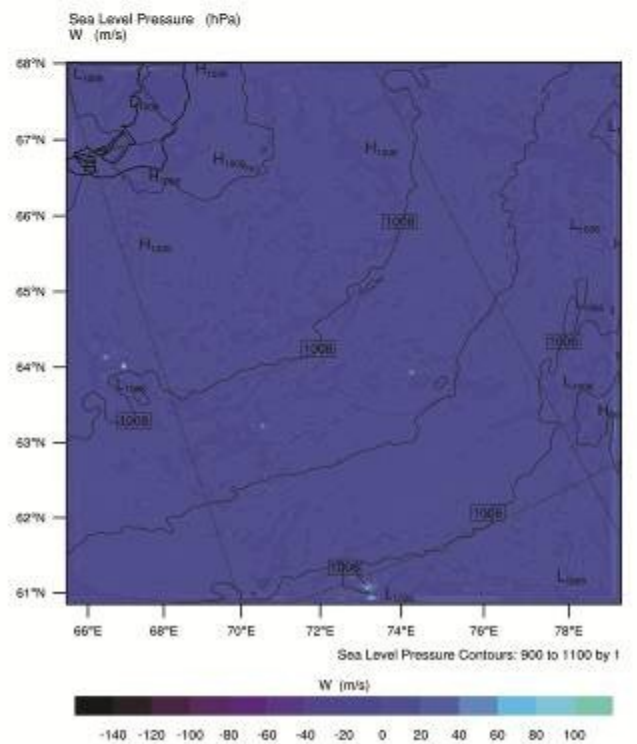
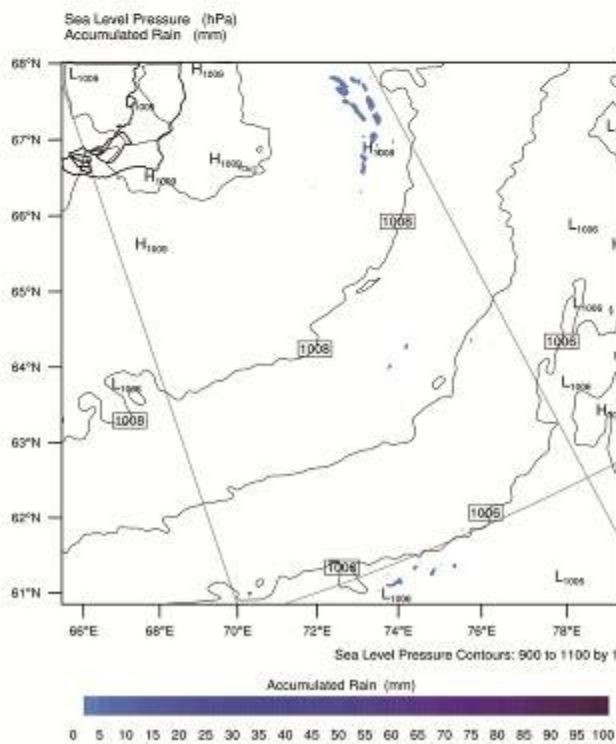
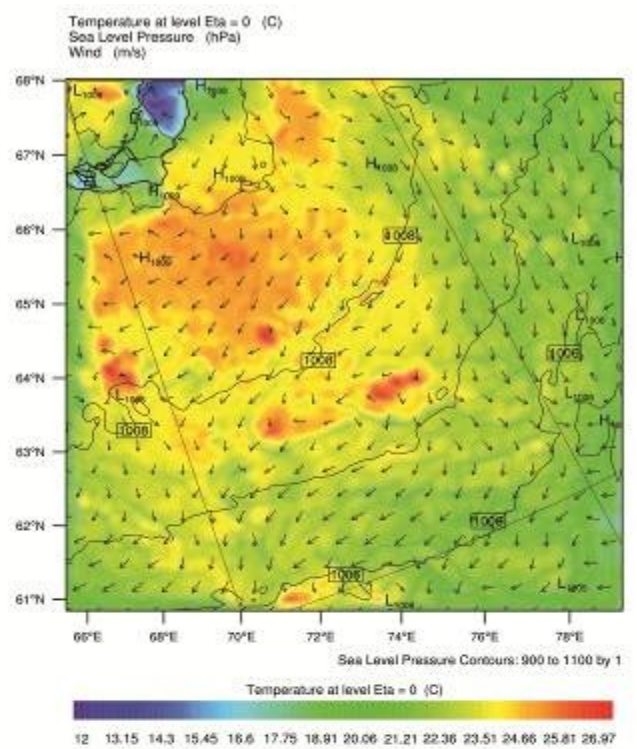
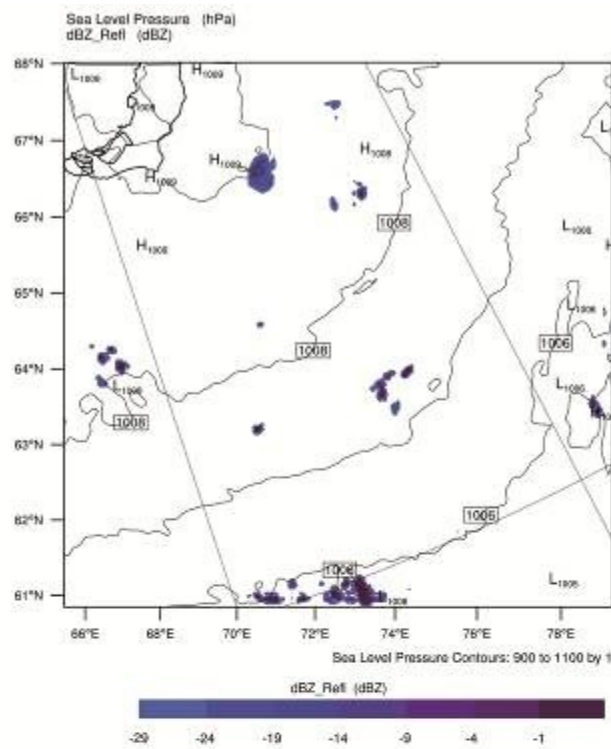
Мал. 18. Значенні показникаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка навалыніцы ў Бангі



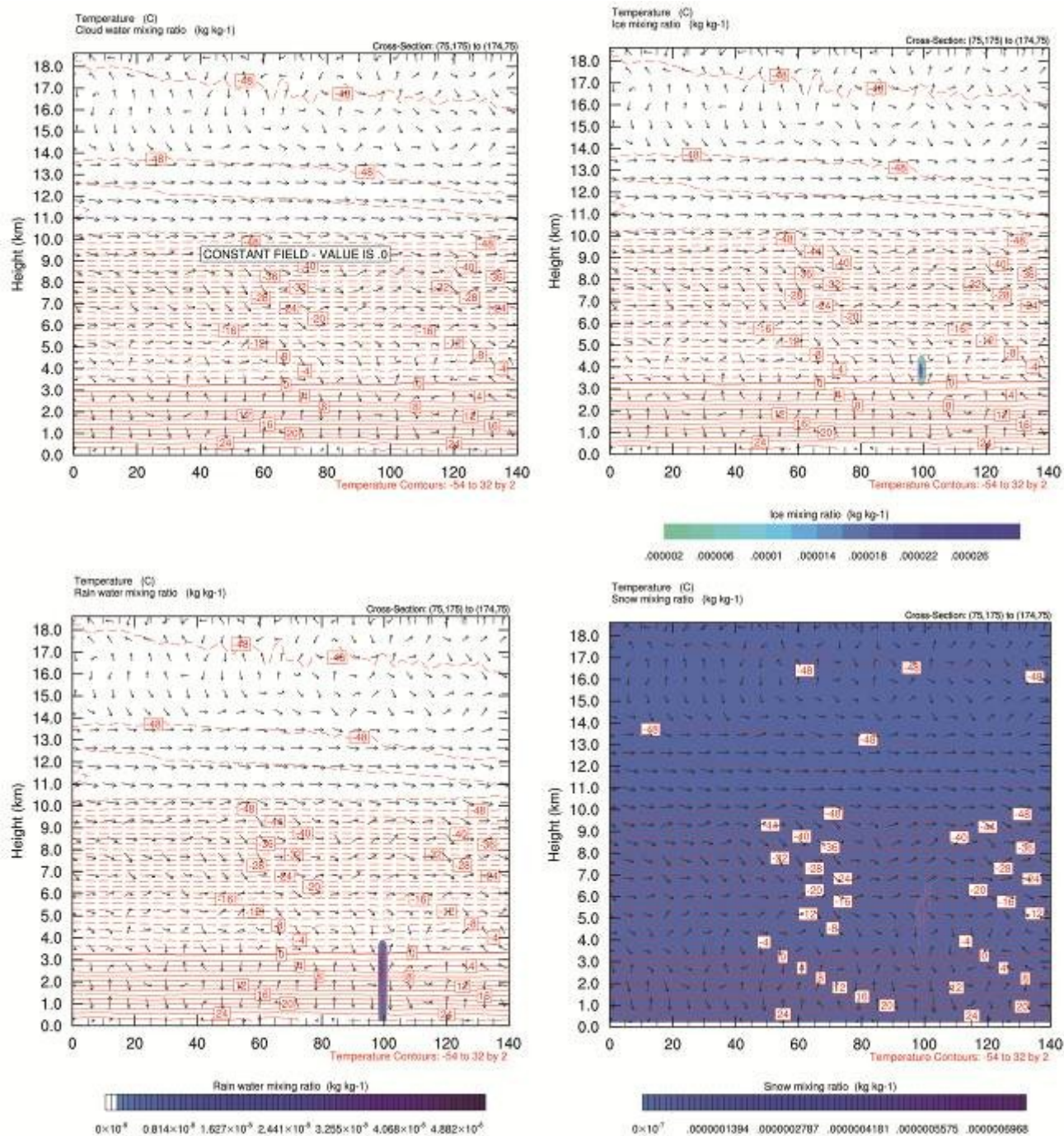
Мал. 19. Вертыкальныя разрэзы (са значэннямі суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навальніцы ў Бангі



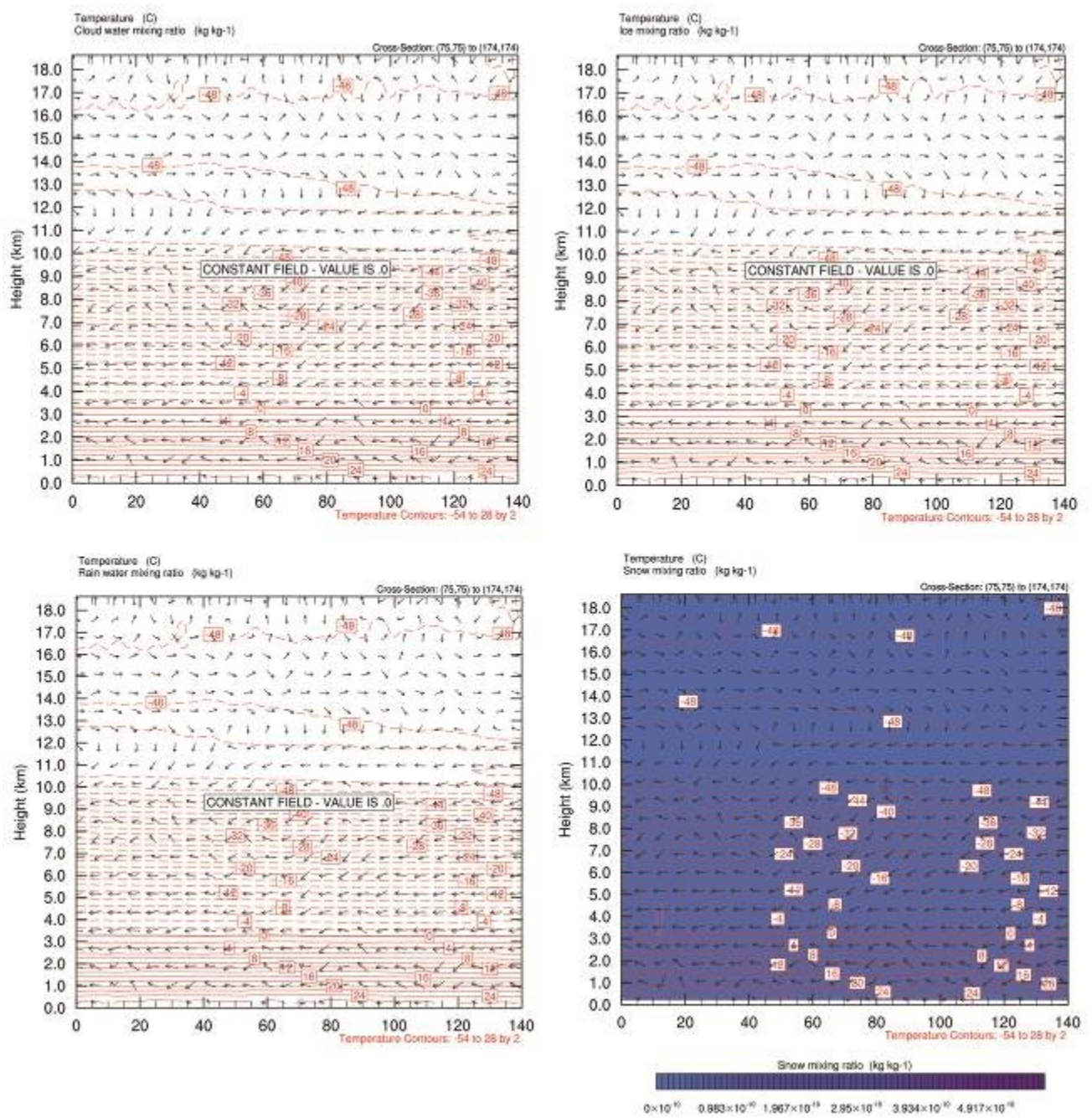
Мал. 20. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалініцы ў Бангі



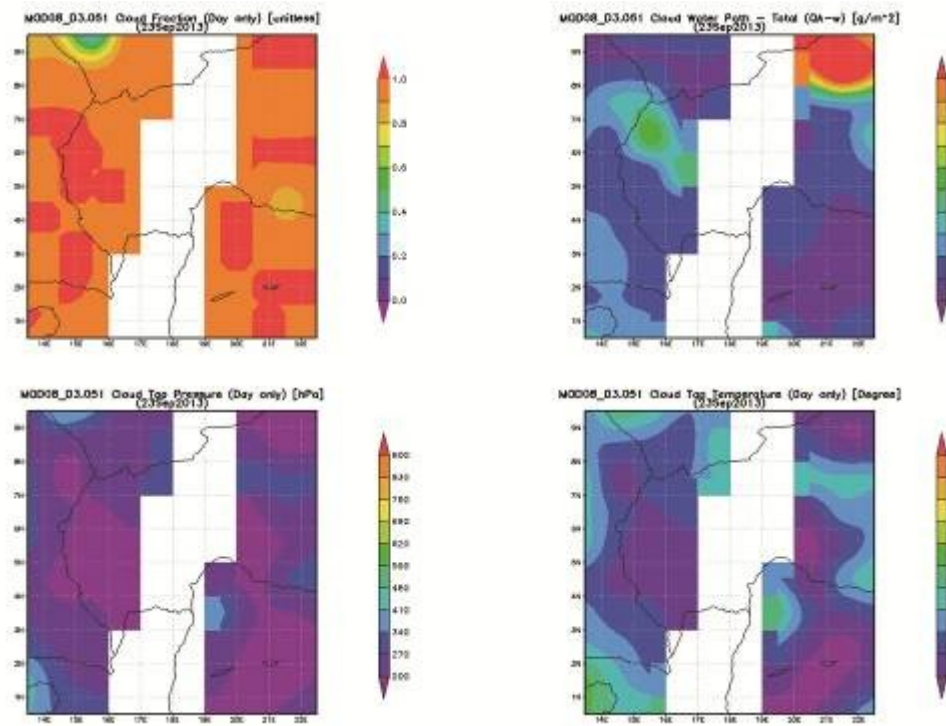
Мал. 21. Значенні показчикаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка навалыны ў Наябрску



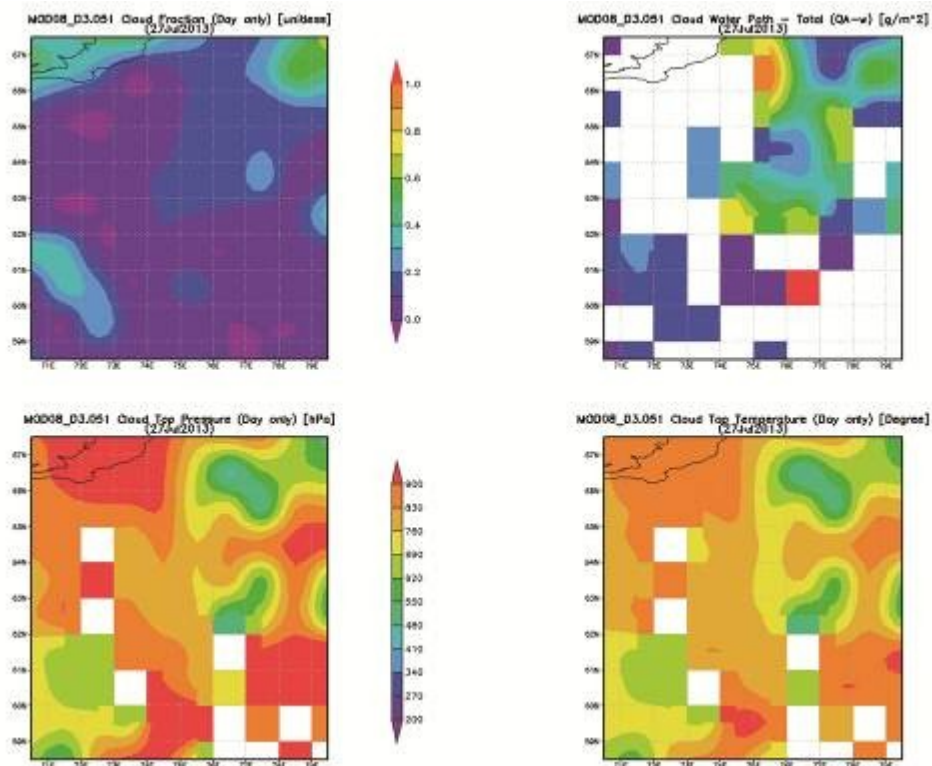
Мал. 22. Вертыкальныя разрэзы (са значэннямі суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалыніцы ў Наябрску



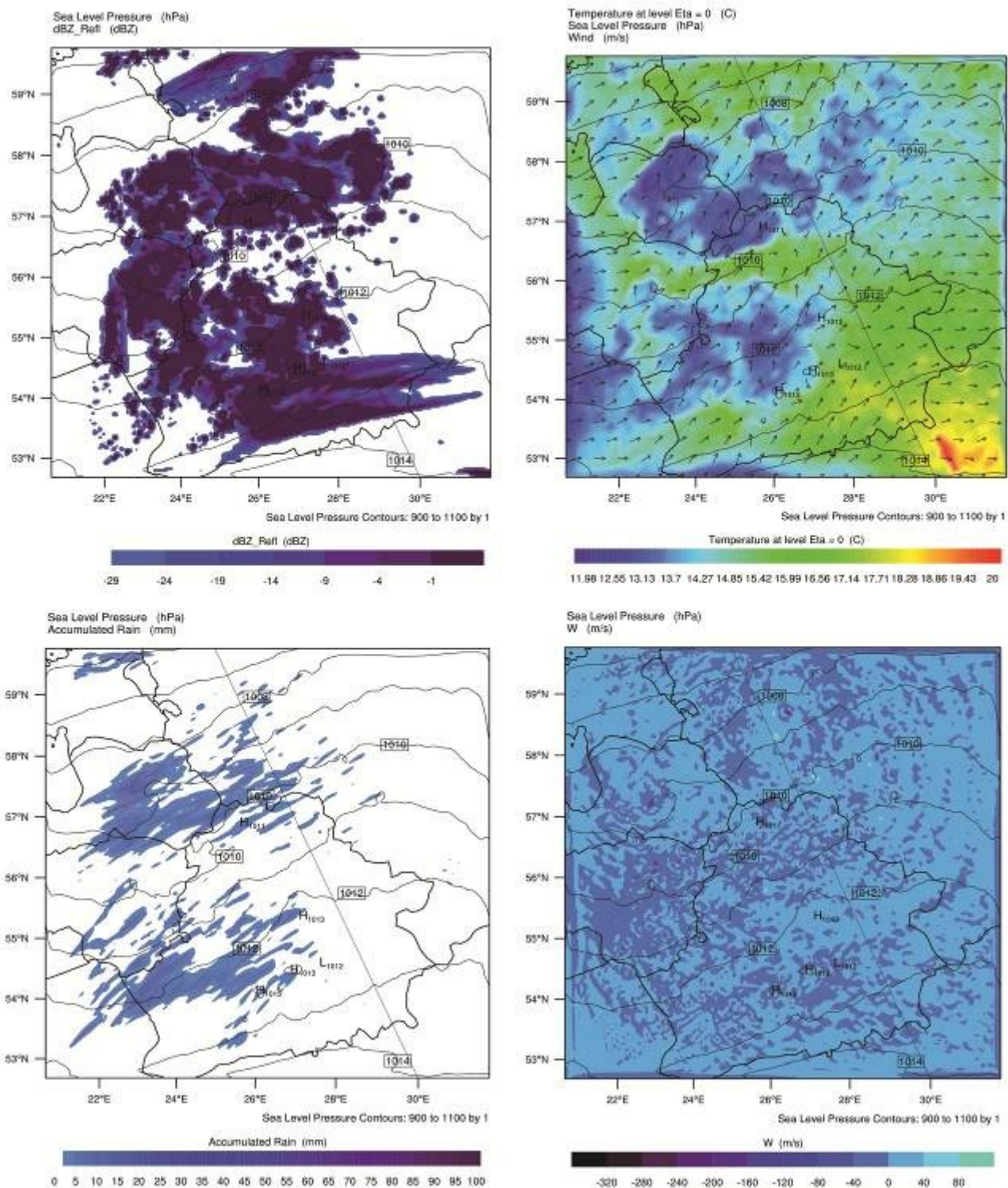
Мал. 23. Вертыкальны разрэзы (са значэннямі суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалыніцы ў Наябрску



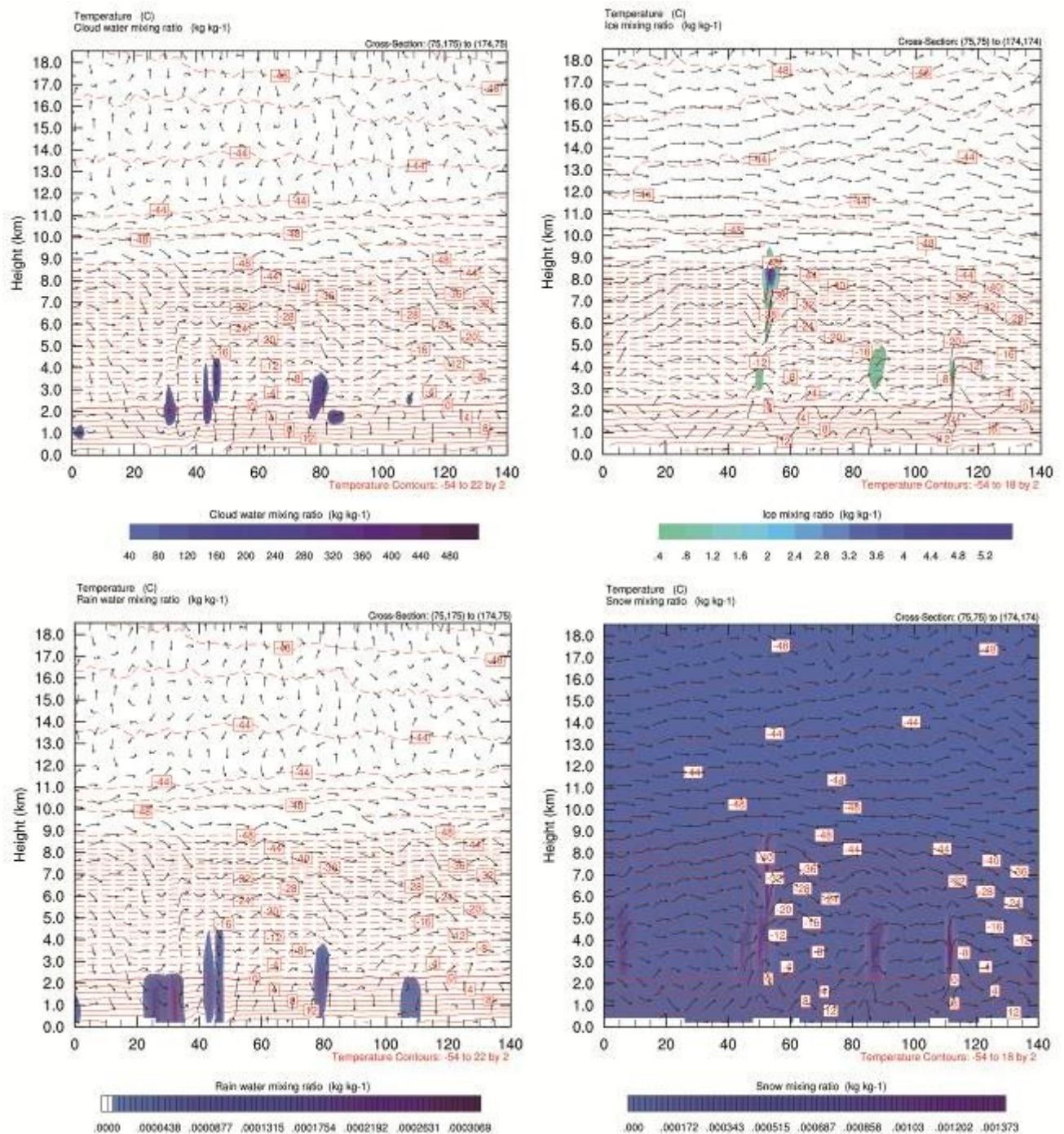
Мал. 24. Спาดарожнікавыя карты для выпадка навалыніцы ў Бангі (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў)



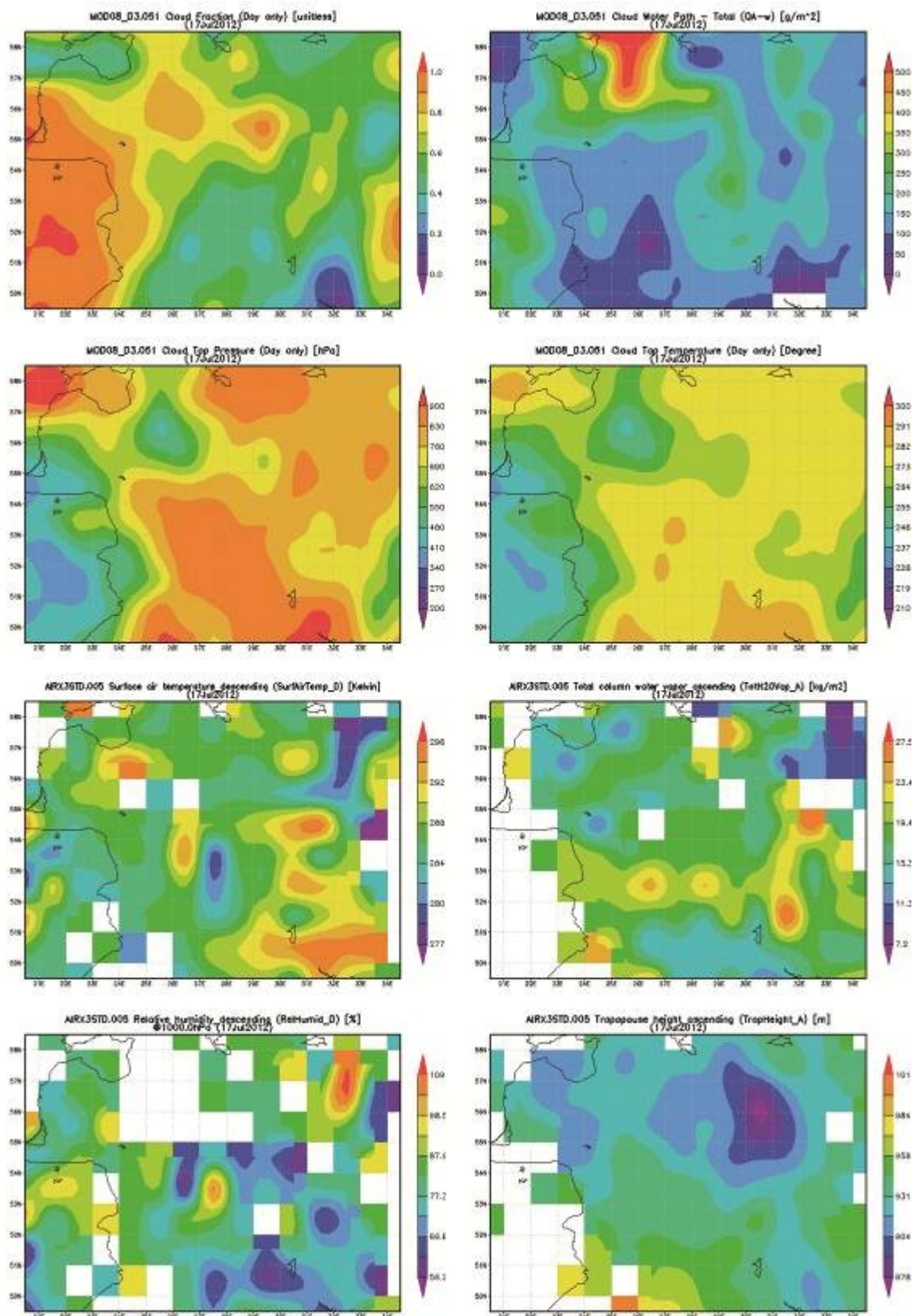
Мал. 25. Спадарожнікавыя карты для выпадка навалыніцы ў Наябрску (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў)



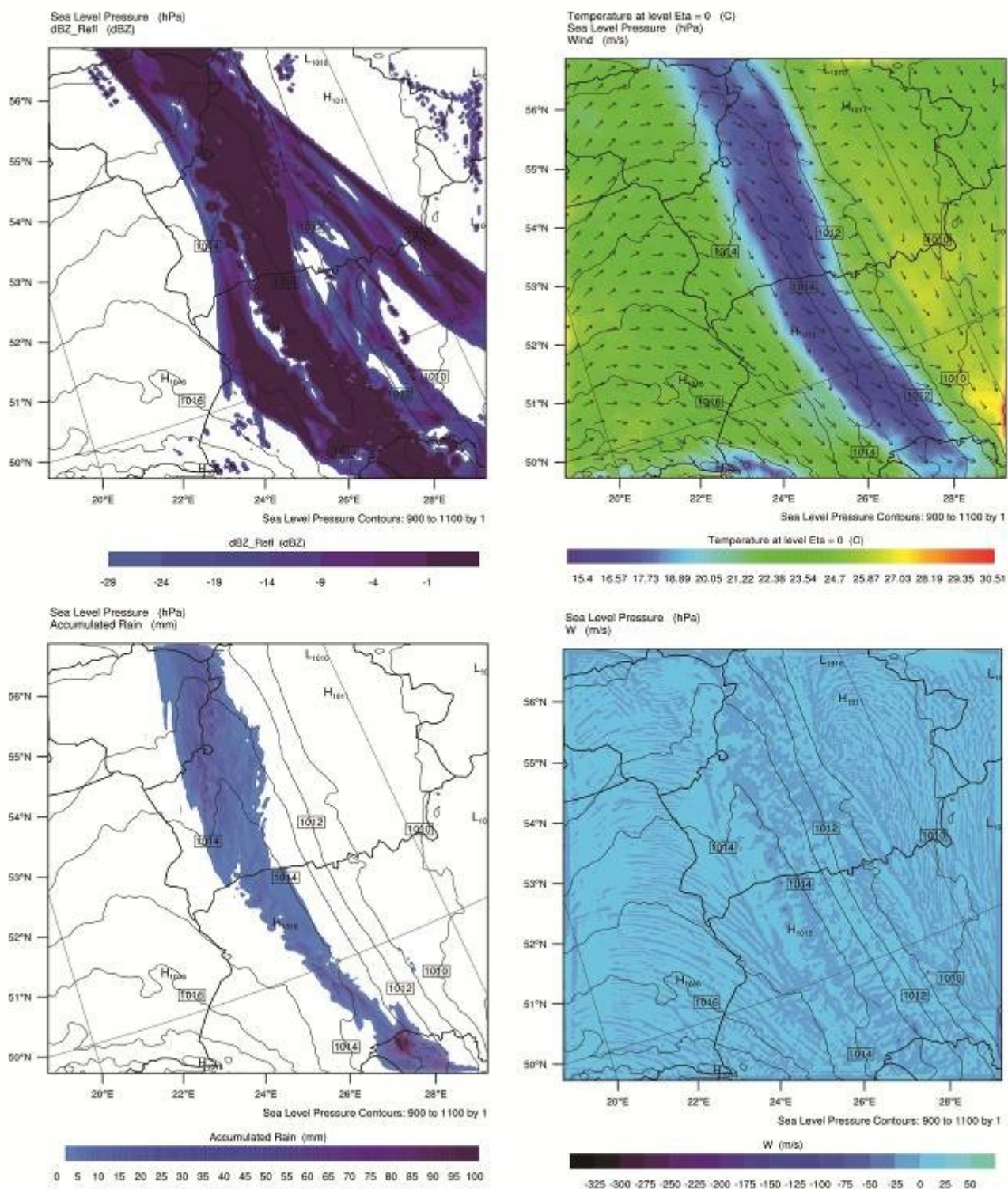
Мал. 26. Значенні показчикаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка праходжання кучава-дажджавога воблака без навальніцы над Лепелем



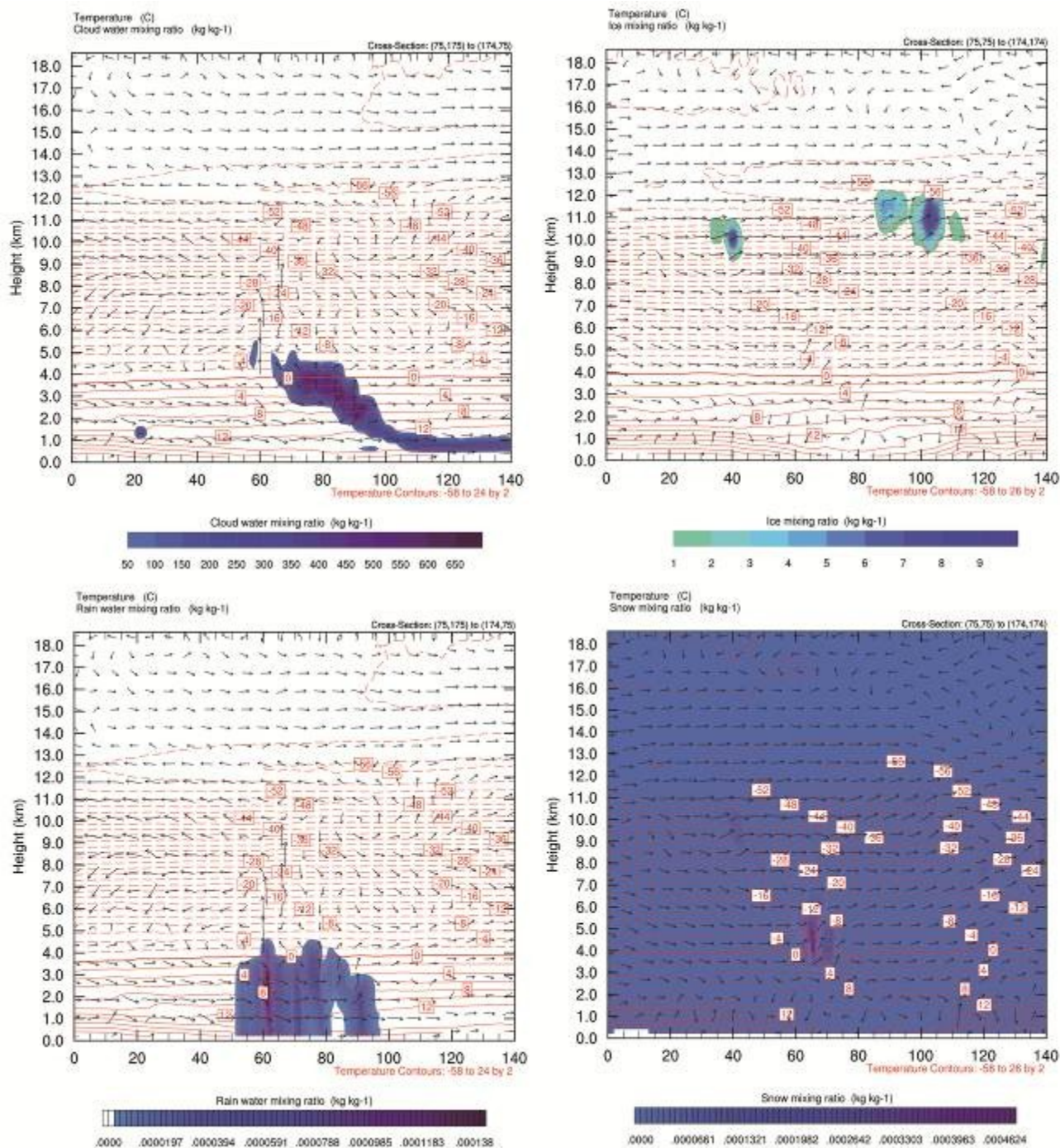
Мал. 27. Астатнія вертыкальныя разрэзы для выпадка праходжання кучава-дажджавога воблака без навалніцы над Лепелем (першая частка была прыведзена ў главе 3.7.)



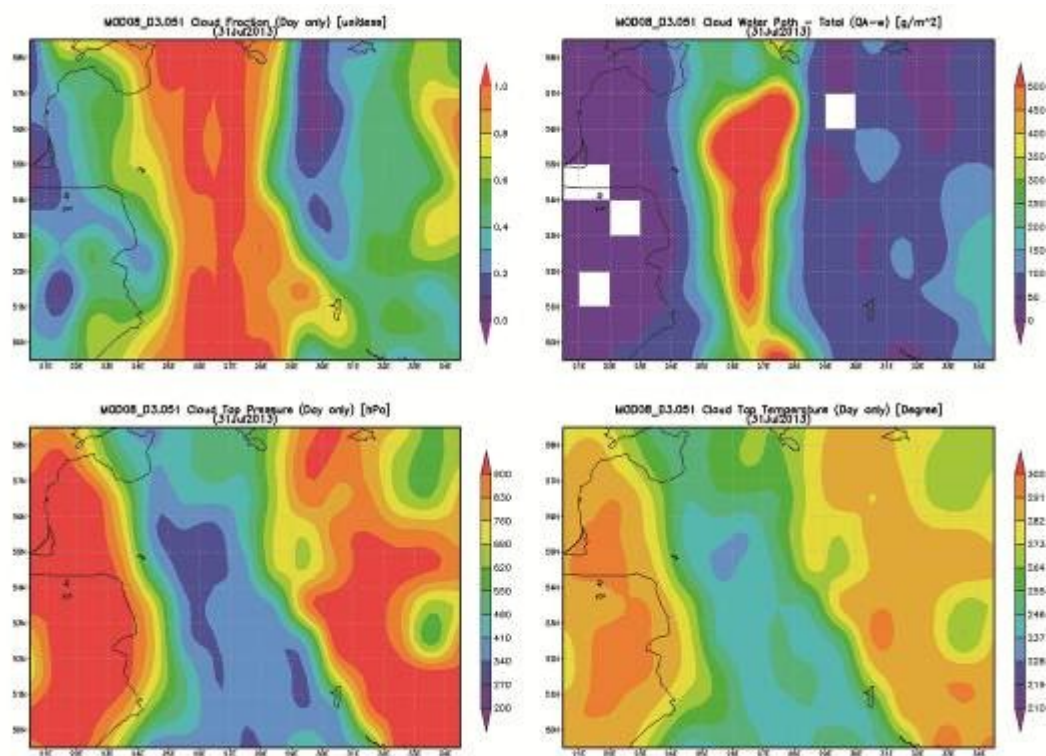
Мал. 28. Спадарожнікавыя карты для выпадка праходжання кучавадажджавога воблака без навалыніцы над Лепелем (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў, прыземнай тэмпературы, вільгацеўтрыманню, адноснай вільготнасці і вышыні трапапаўзы)



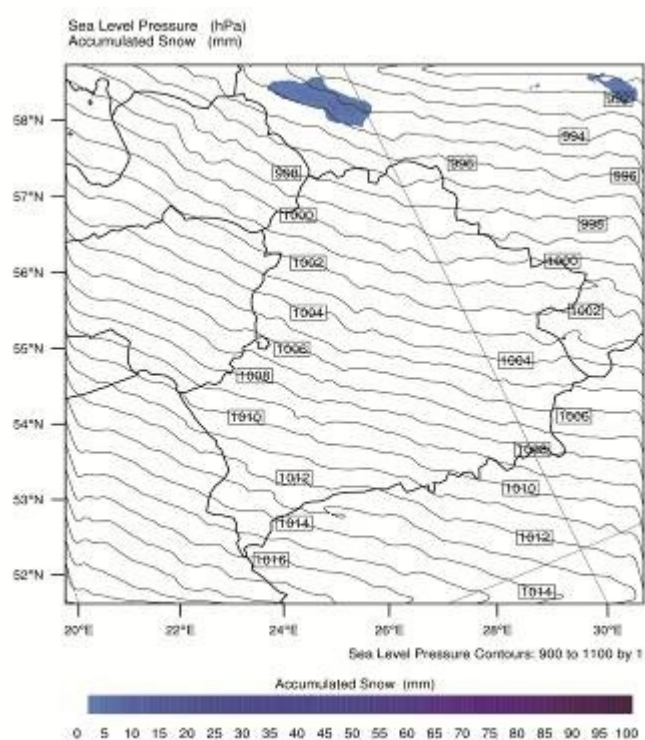
Мал. 29. Значенні показчикаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка праходжання кучава-дажджавога воблака без навальніцы над Пінскам



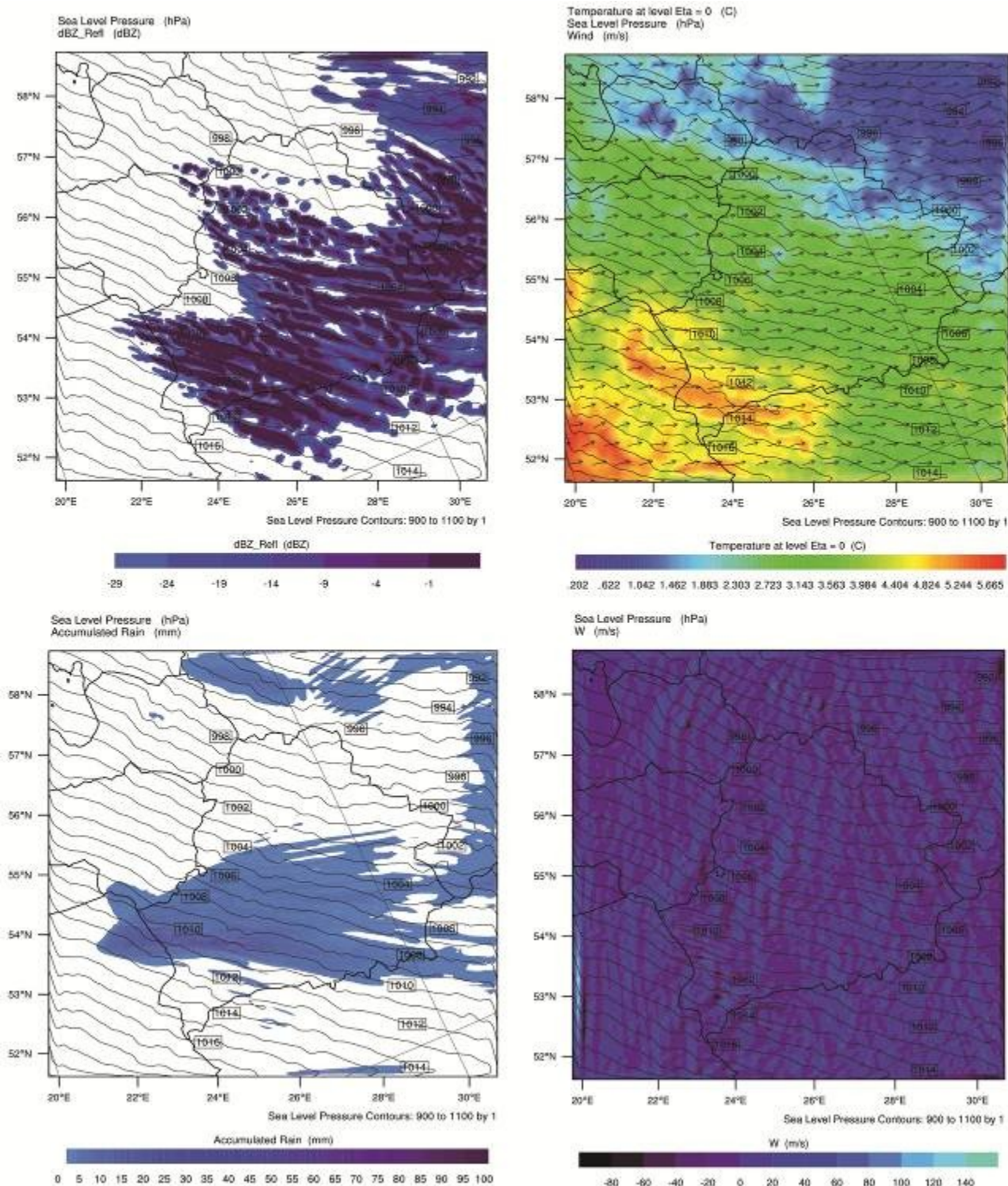
Мал. 30. Астатнія вертыкальныя разрэзы для выпадка праходжання кучава-дажджавога воблака без навалыніцы над Пінскам (першая частка была прыведзена ў главе 3.7.)



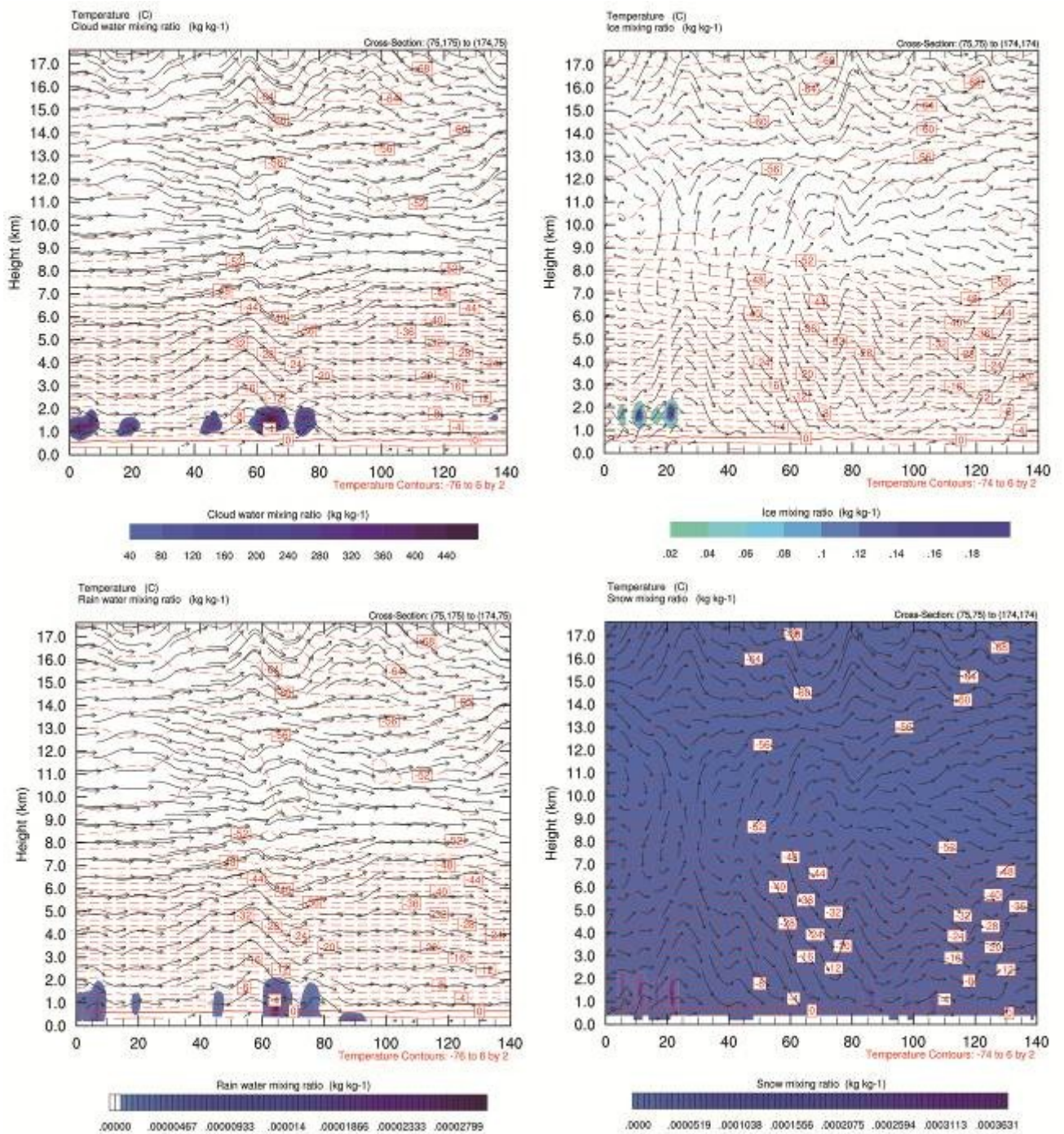
Мал. 31. Спадарожнікавыя карты для выпадка праходжання кучавадажджавога воблака без навалніцы над Пінскам (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў)



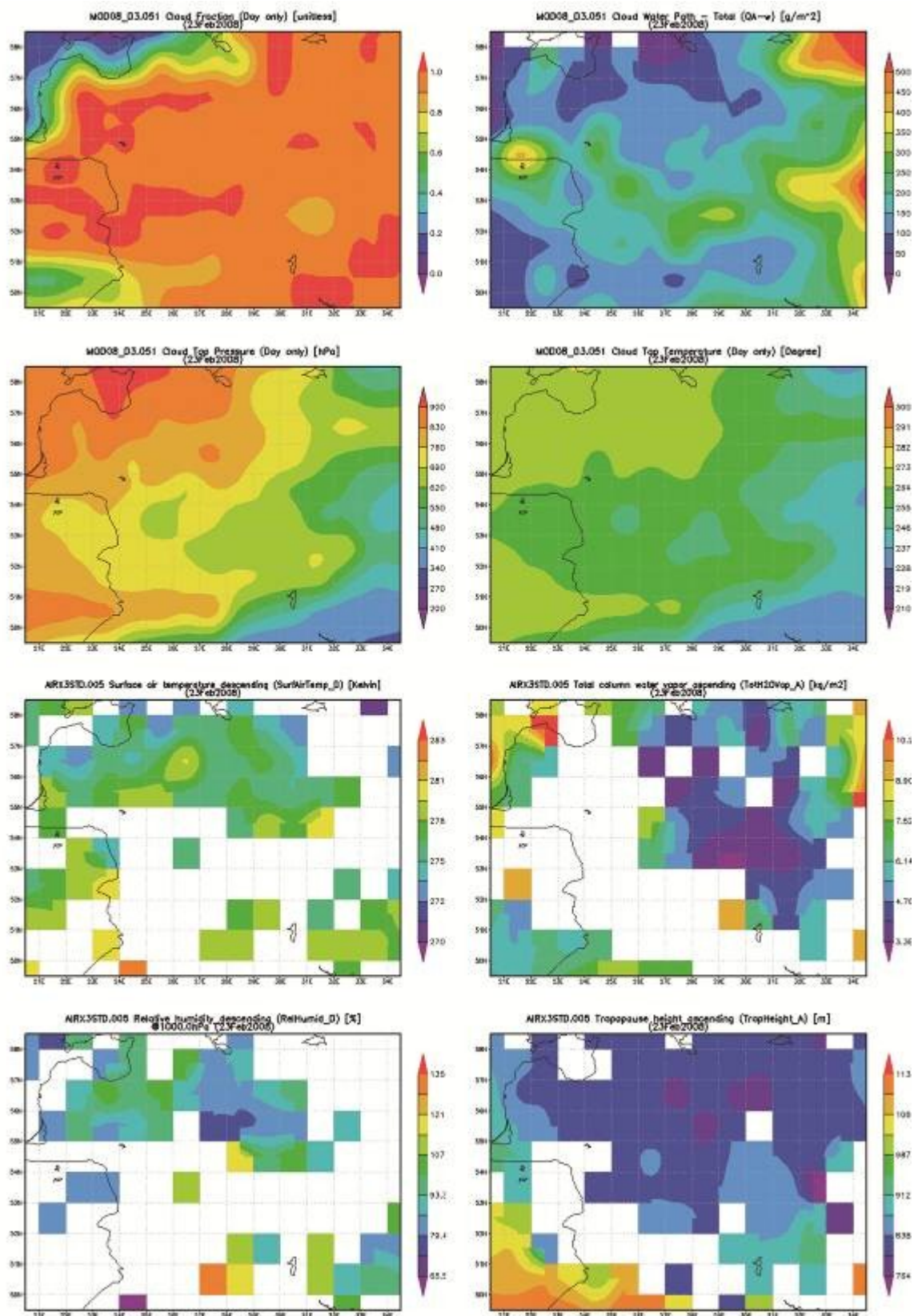
Мал. 32. Значэнне паказчыка акумуляванай колькасці цвёрдых ападкаў для выпадка зімовай навалніцы ў Мінску



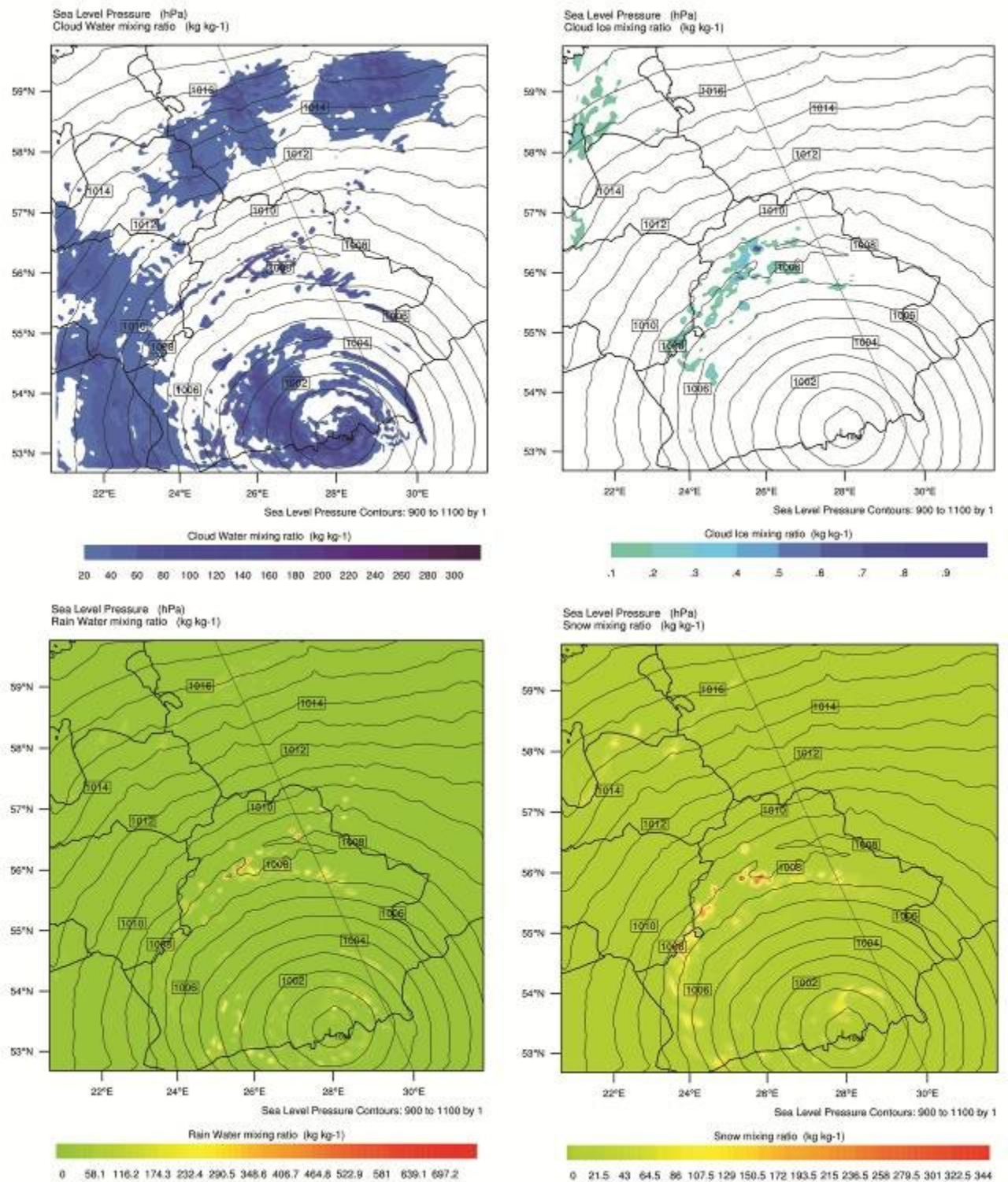
Мал. 33. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадка зімовай навальніцы ў Мінску



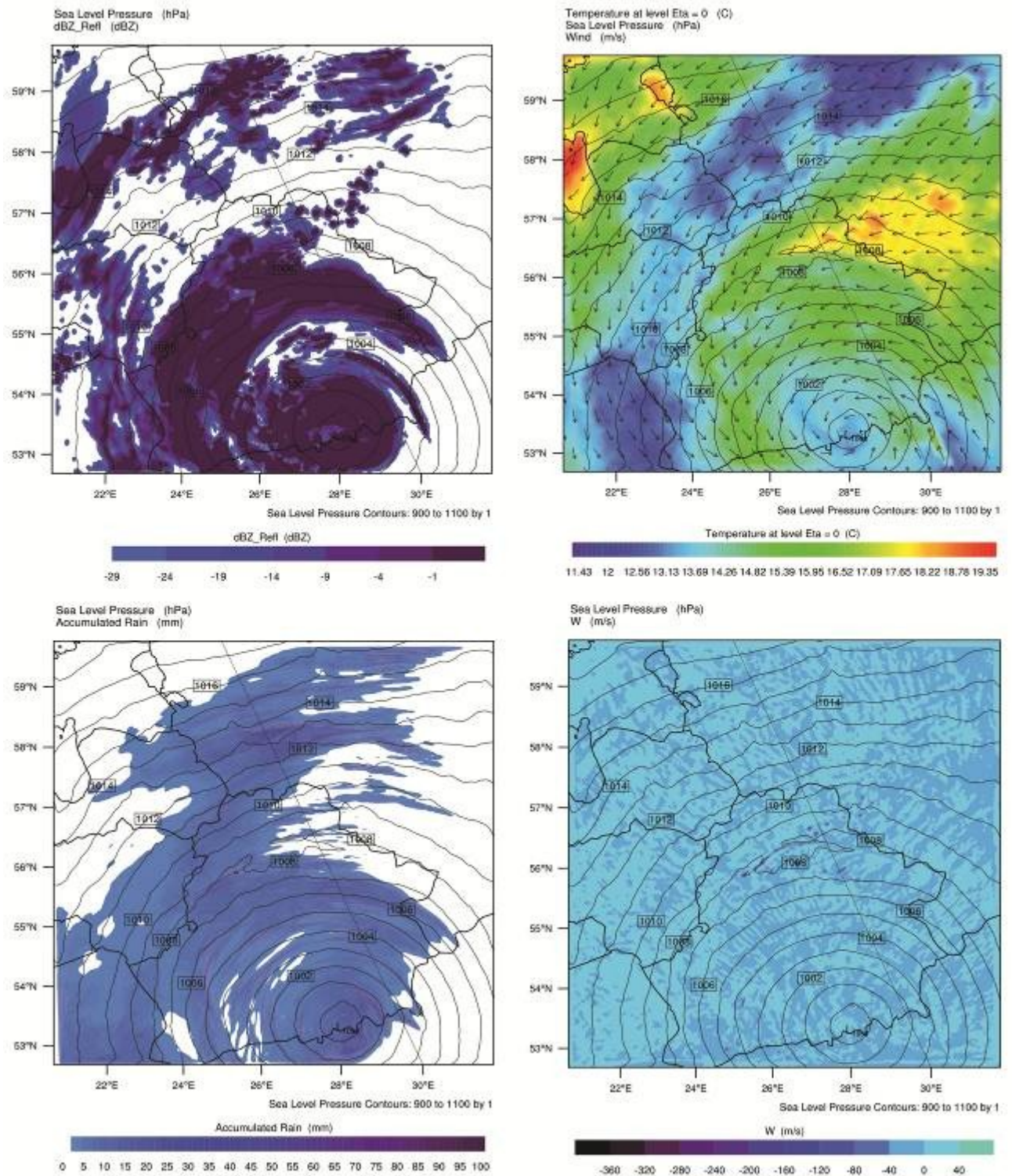
Мал. 34. Астатнія вертыкальныя разрэзы для выпадка зімай навалніцы ў Мінску (першая частка была прыведзена ў главе 3.7.)



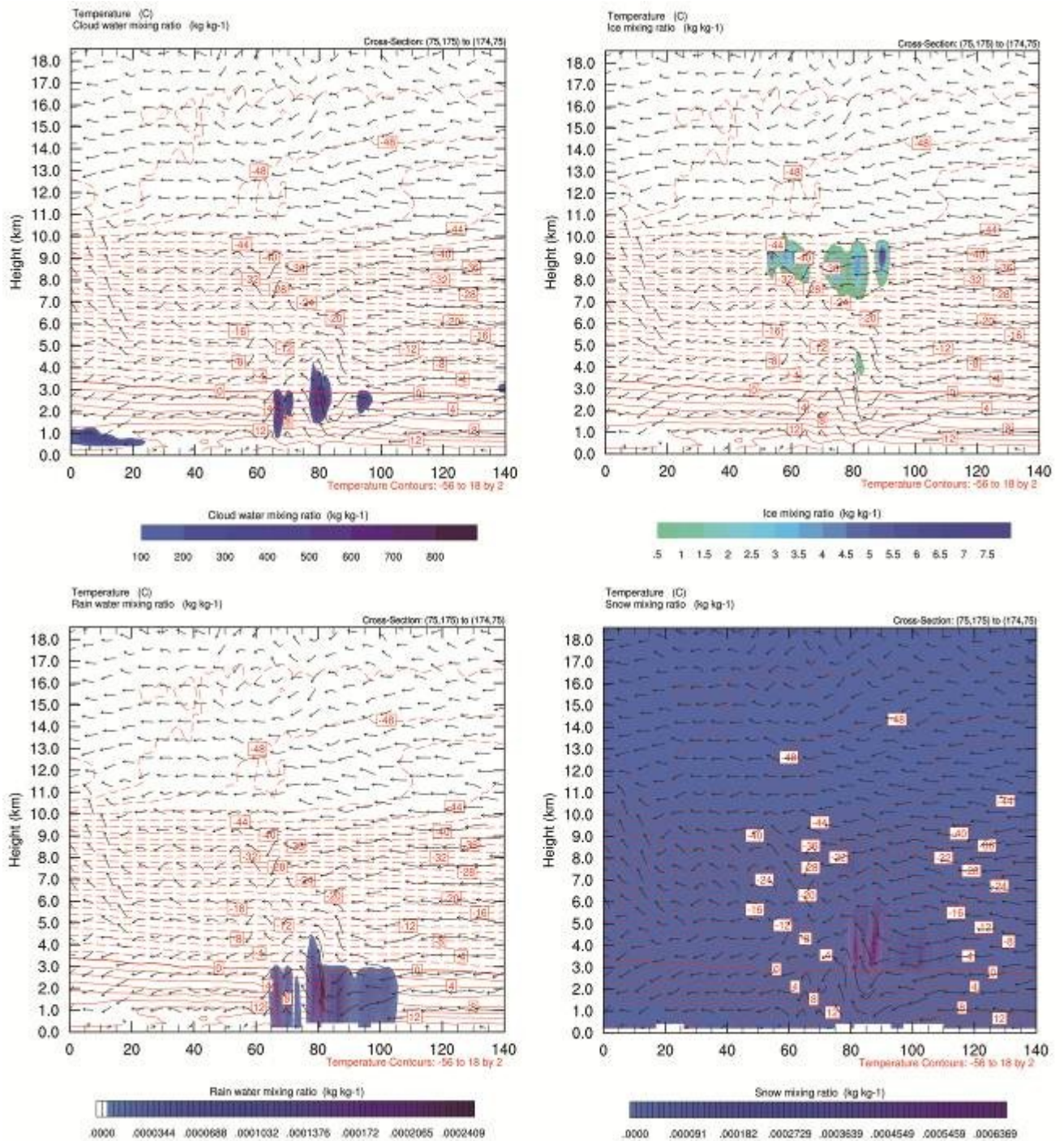
Мал. 35. Спадарожнікавыя карты для выпадка зімовай навальніцы ў Мінску (прыведзены звесткі па асярэдненым за дзень воблачнаму пакрыццю, агульнаму ўтрыманню вільгаці, ціску і тэмпературы на верхняй мяжы воблакаў, прыземнай тэмпературы, вільгацеўтрыманню, адноснай вільготнасці і вышыні трапапаўзы)



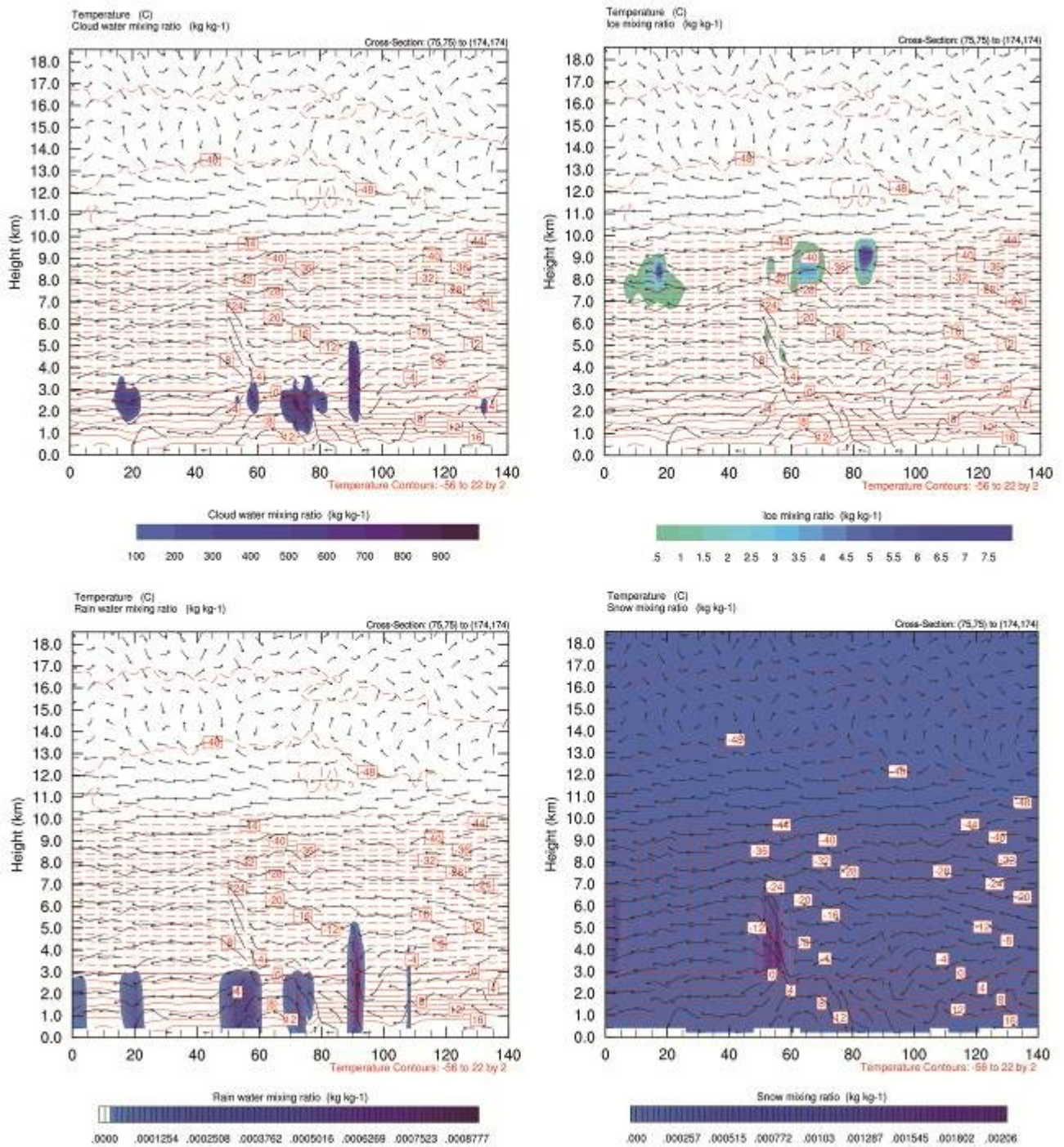
Мал. 36. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №8 з уключанай функцыяй дэмпфавання



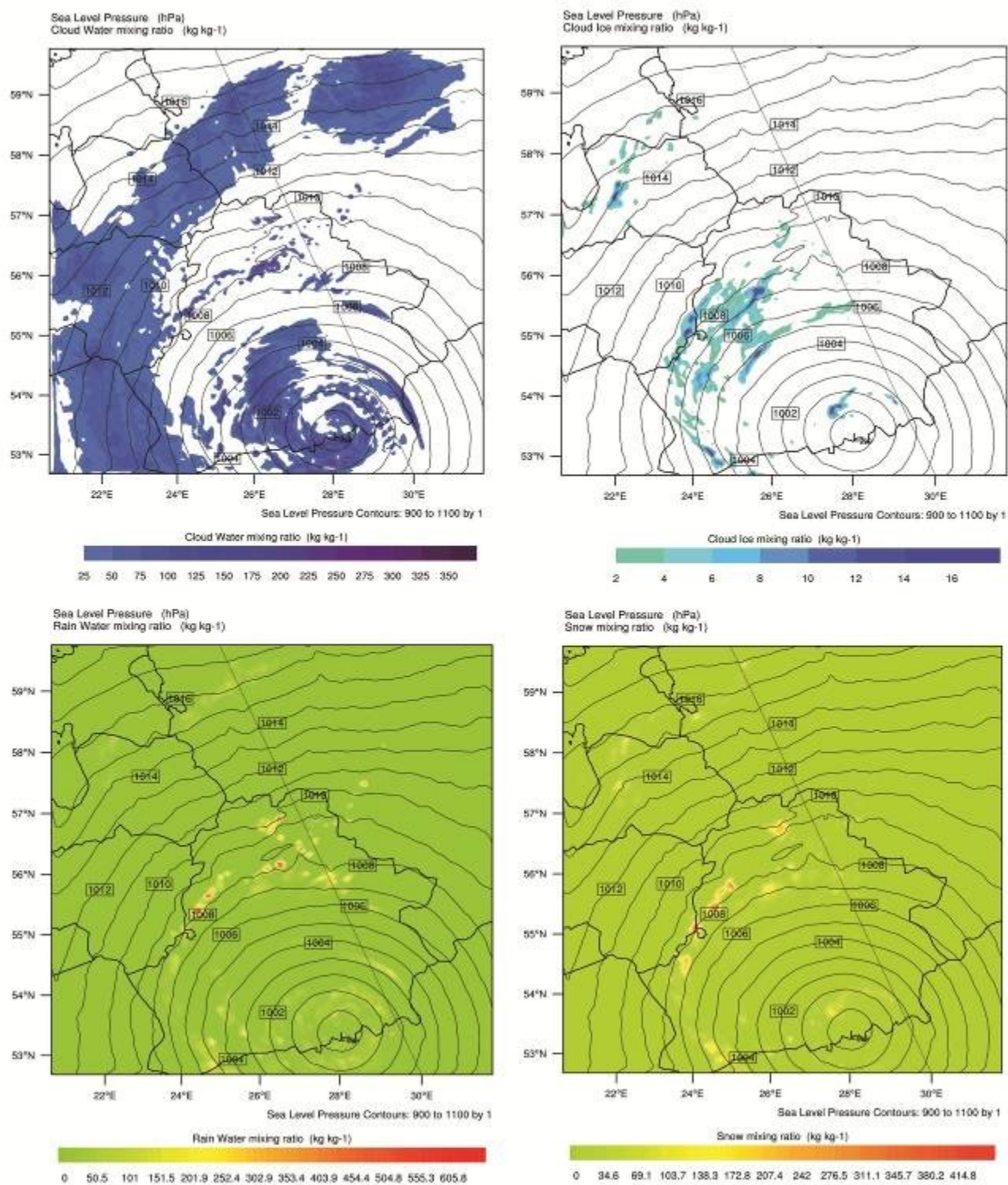
Мал. 37. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №8 з уключанай функцыяй дэмпфавання



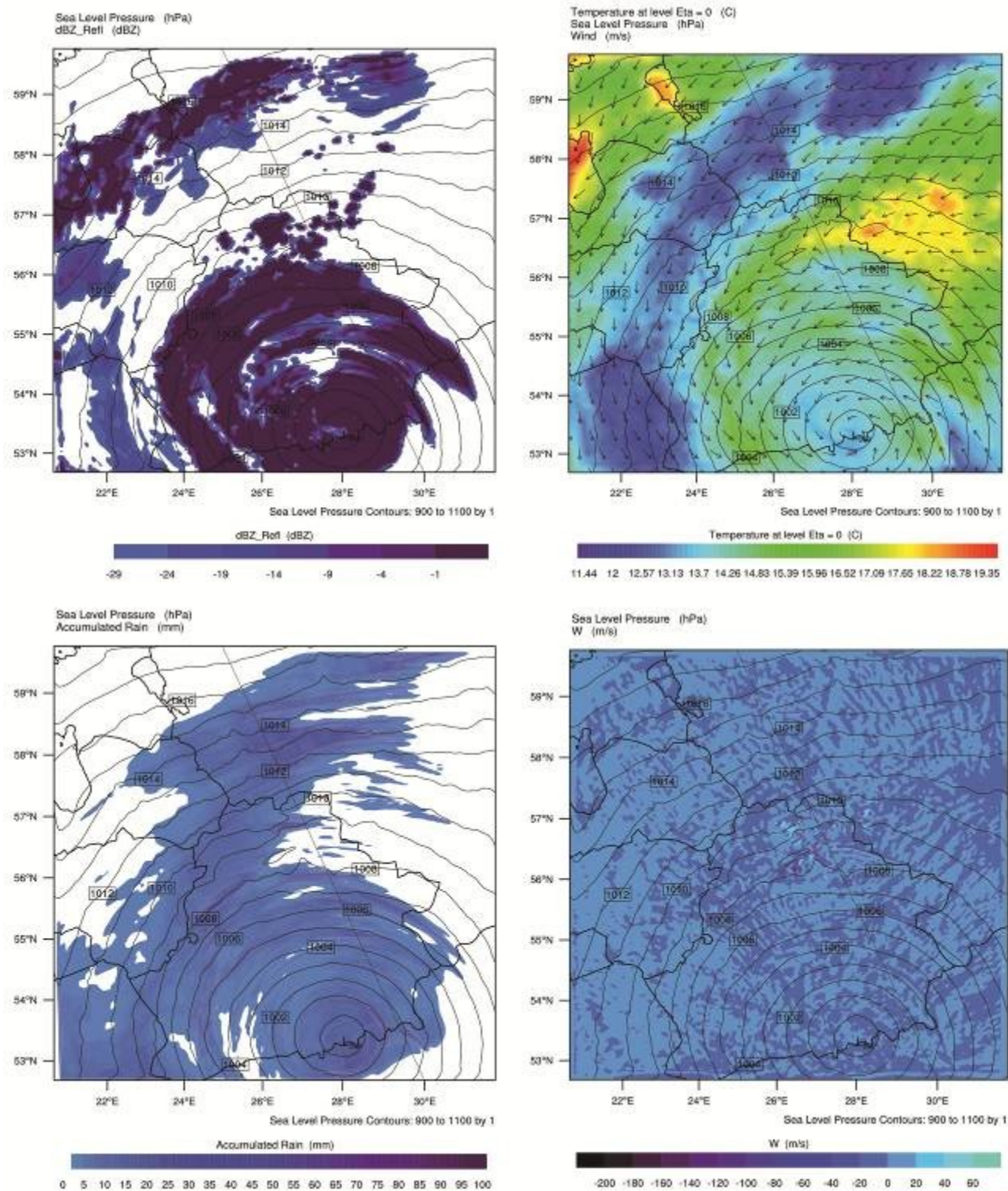
Мал. 38. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №8 з уключанай функцыяй дэмпфавання



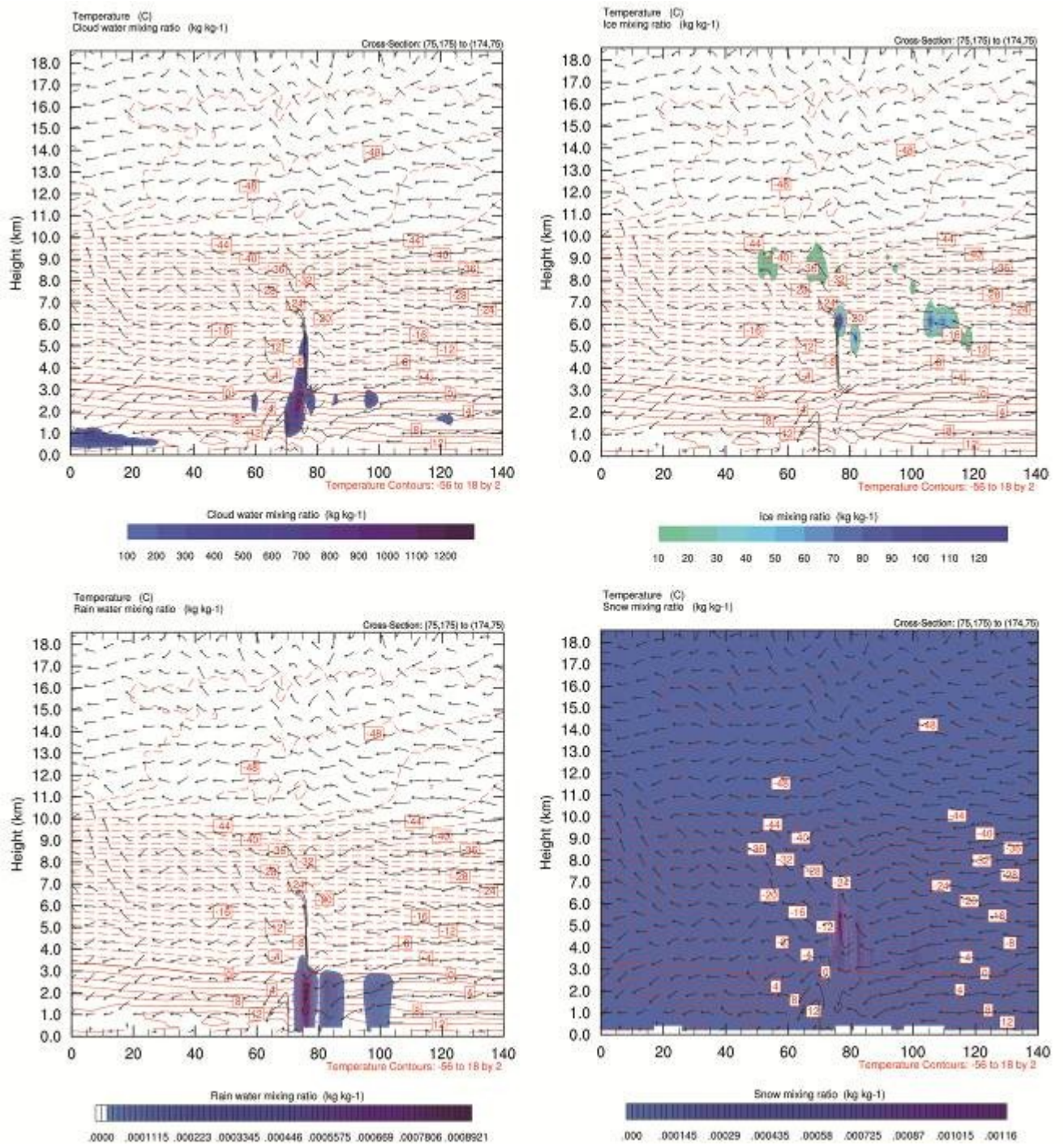
Мал. 39. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №8 з уключанай функцыяй дэмпфавання



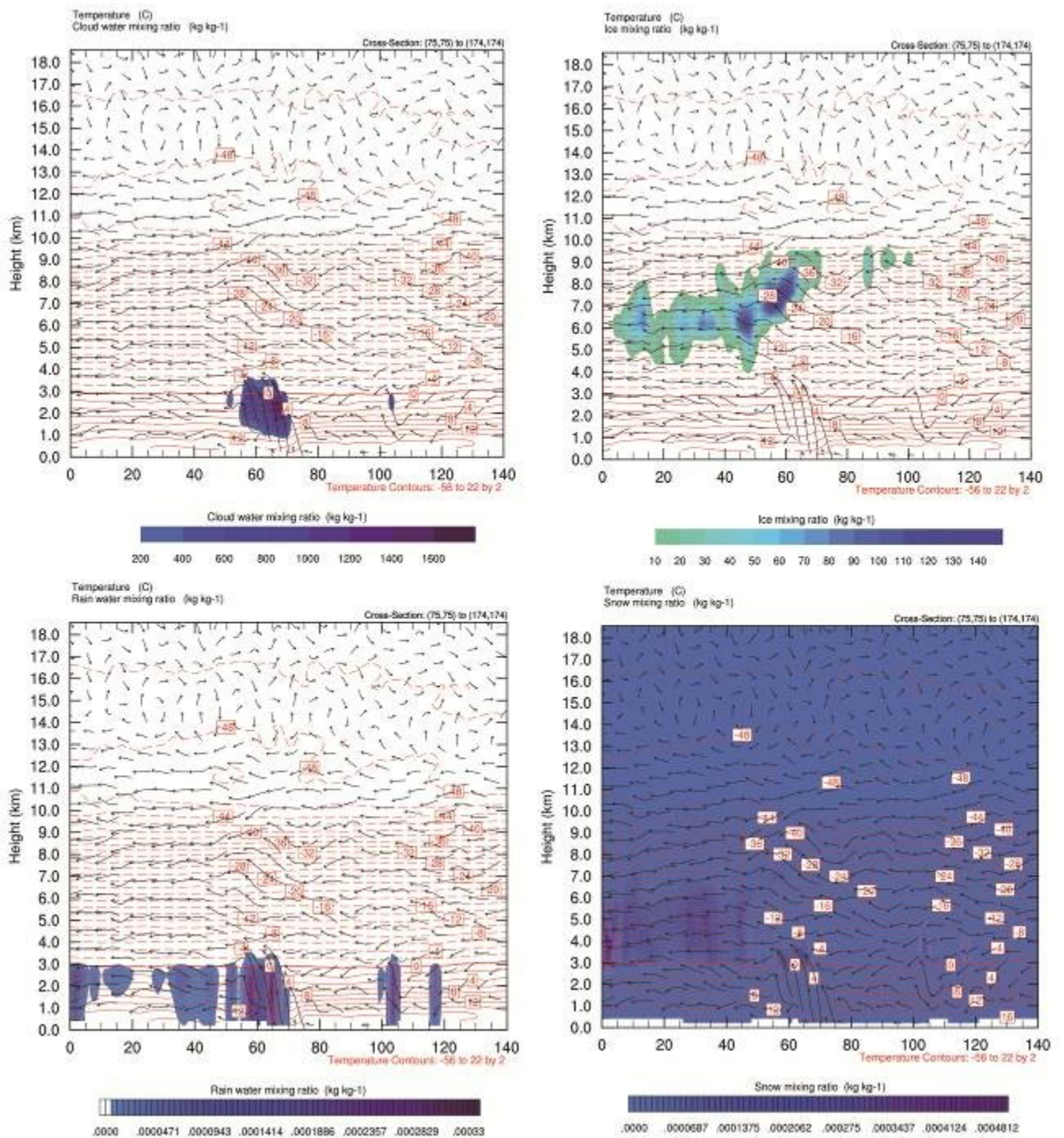
Мал. 40. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №7



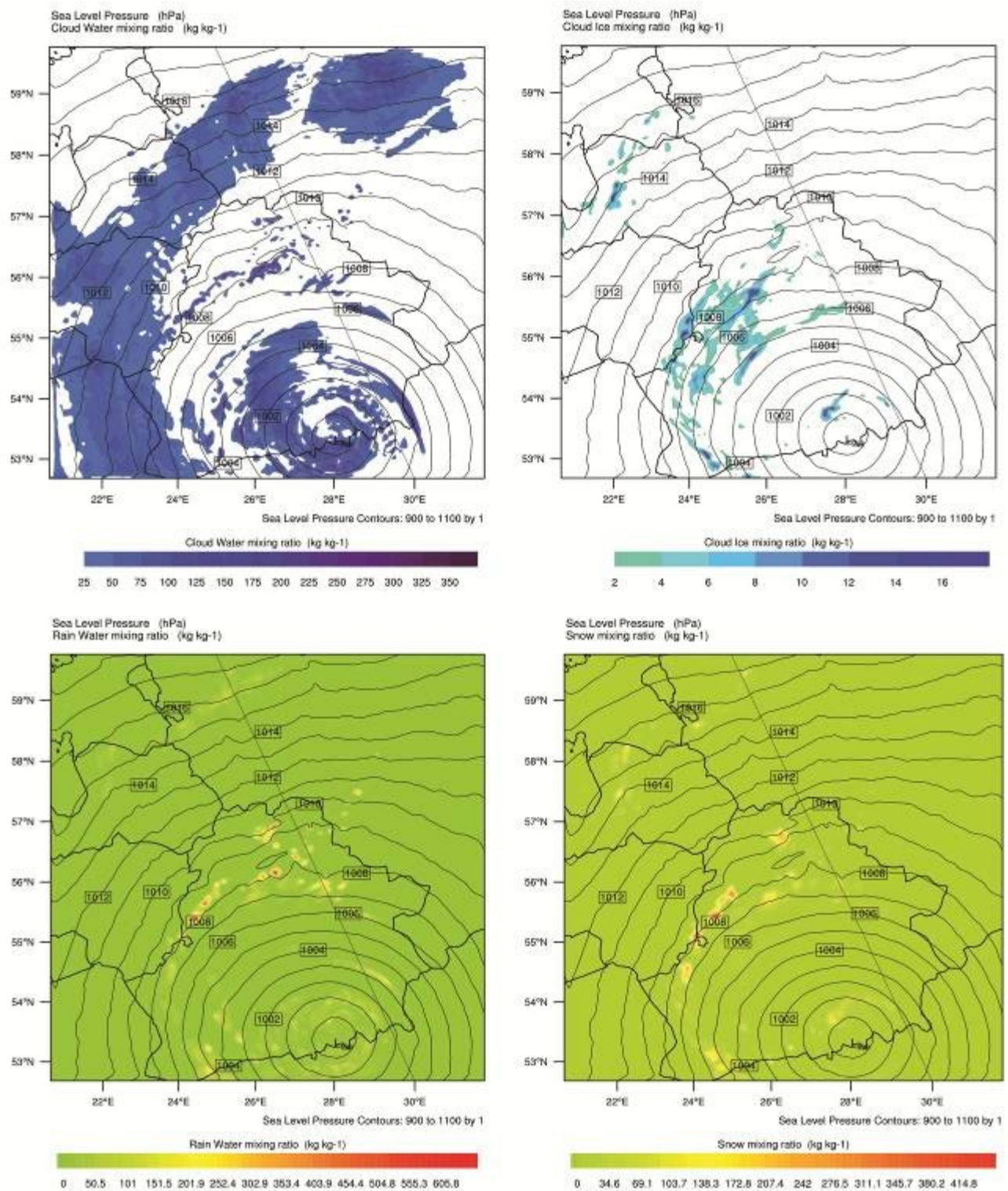
Мал. 41. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №7



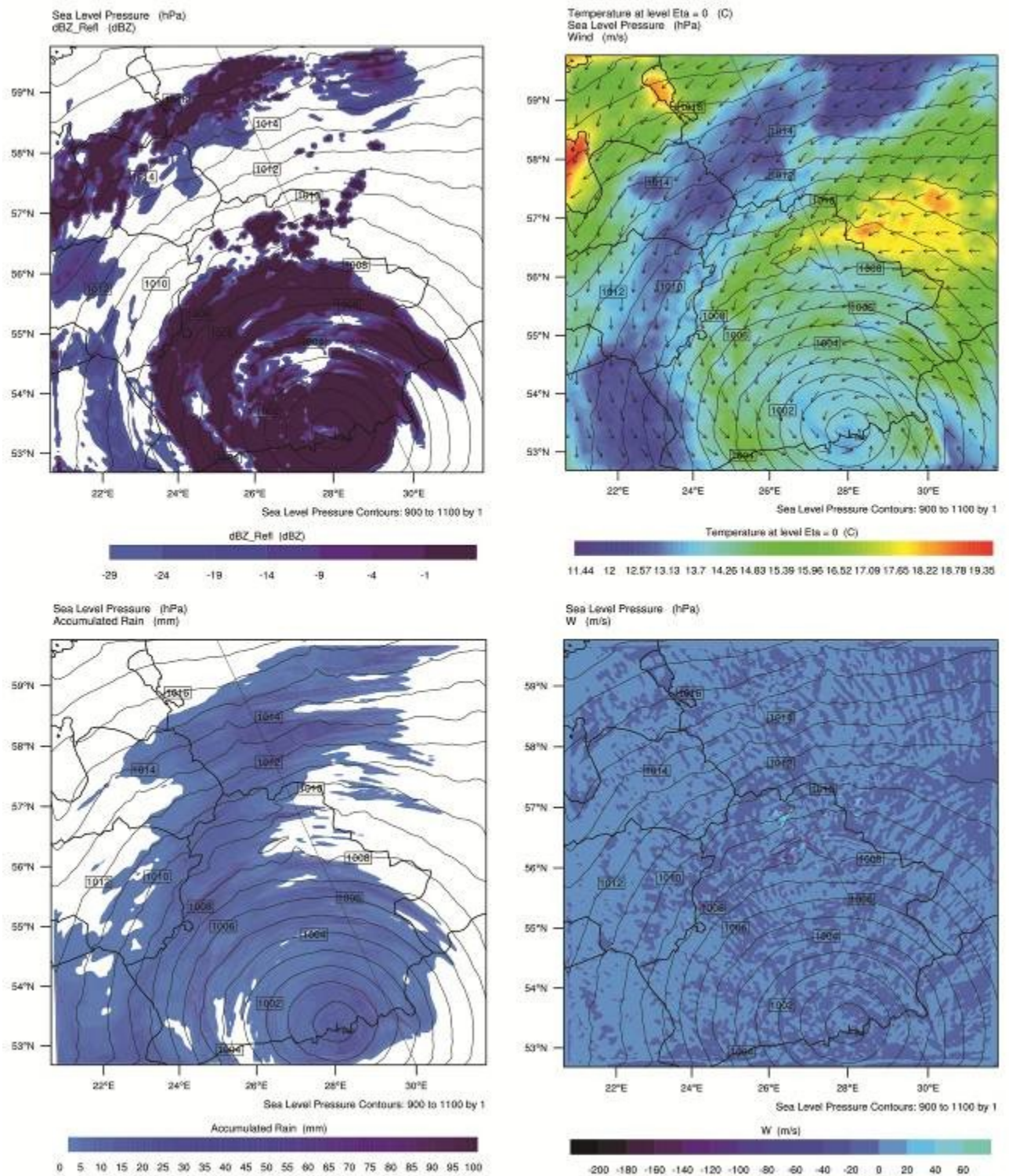
Мал. 42. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №7



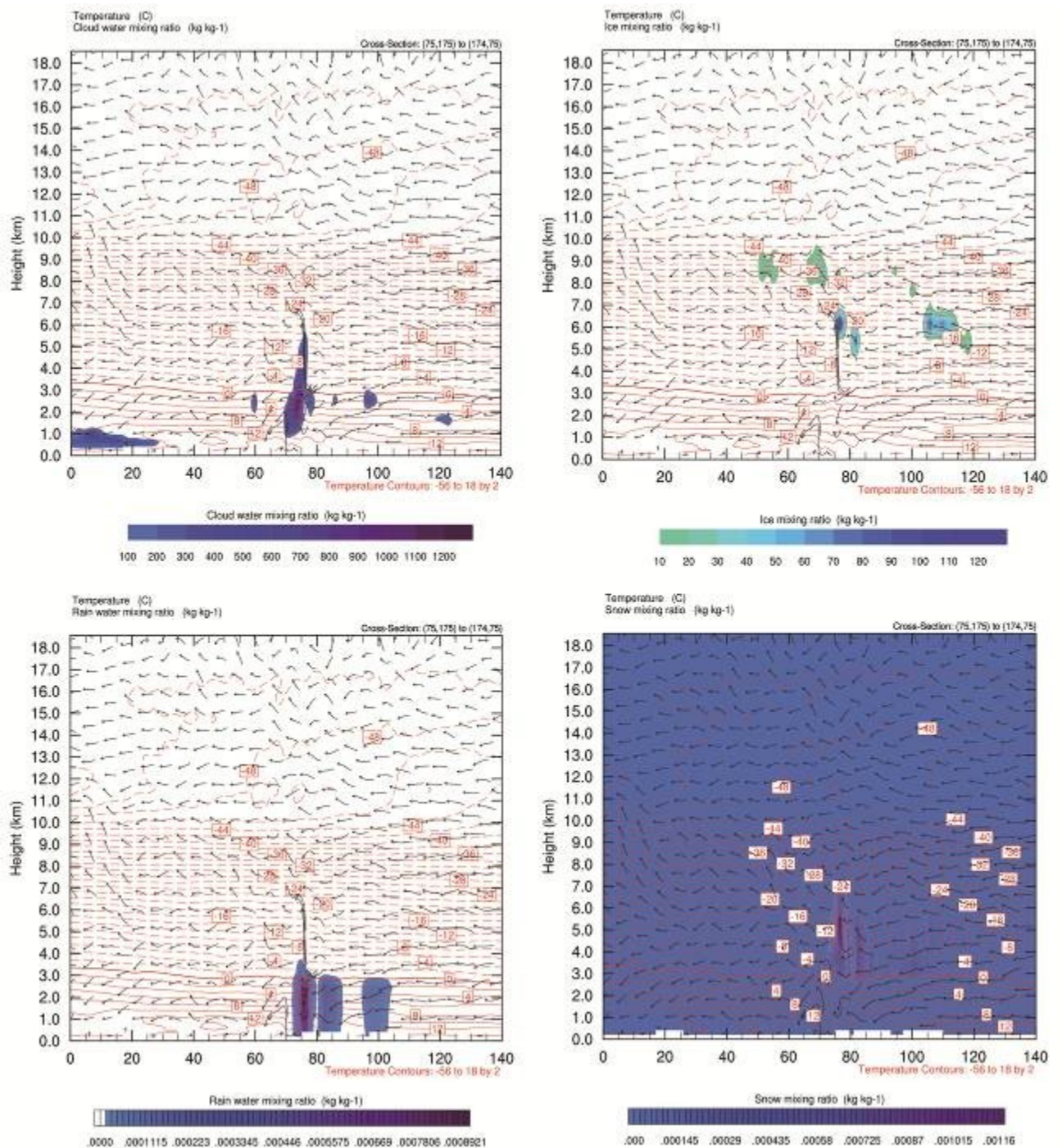
Мал. 43. Вертикальні розрізи (са значеннями суцільних сумішей частінок хмарних і дощових крапель, ледяних кристаликів і сніга) по лінії південно-захід – північно-схід через центральну частину дамена для випадку навалниці у Лепелі, атримані при використанні розрізкової схеми №7



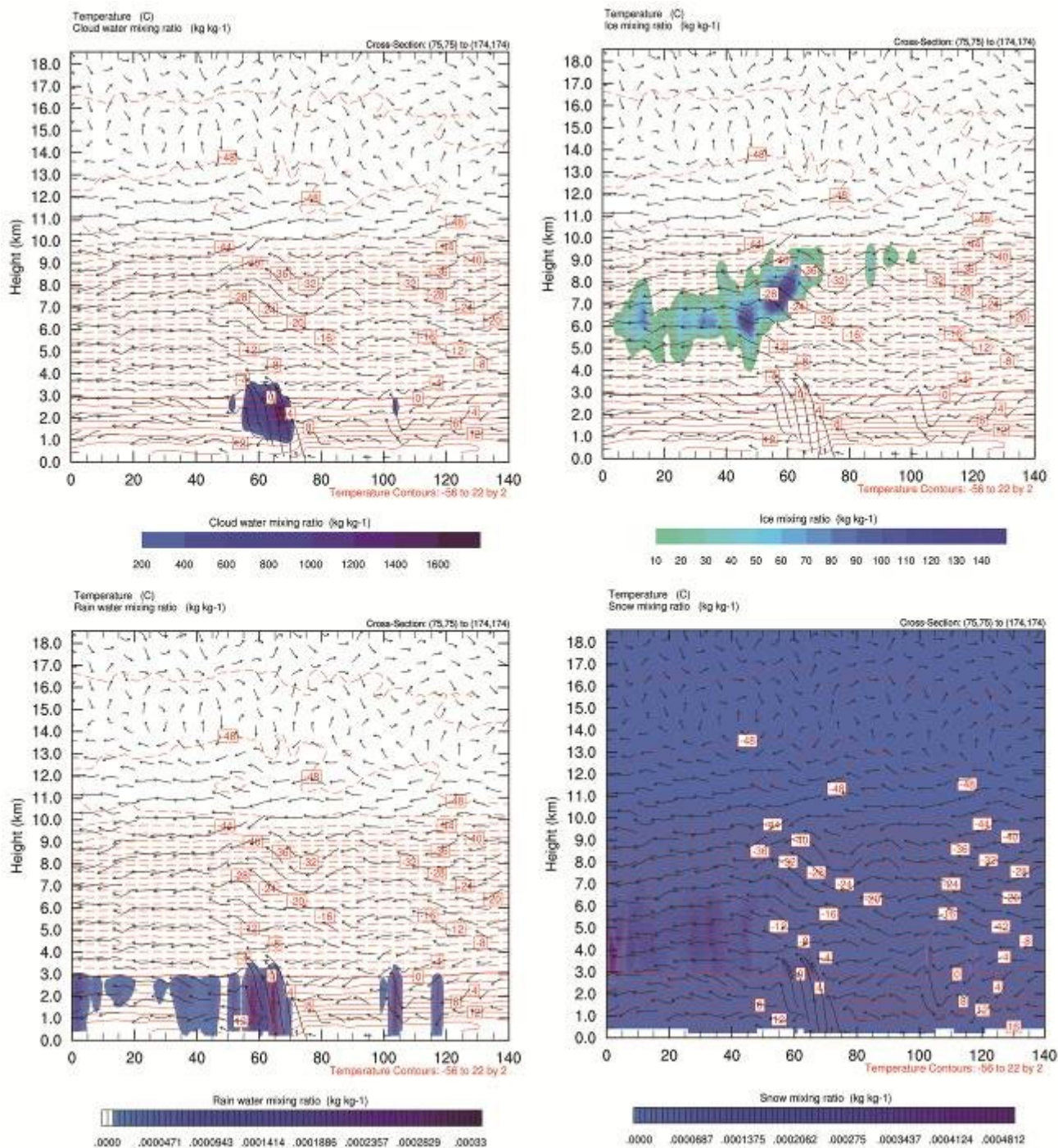
Мал. 44. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №7 з уключанай функцыяй дэмпфавання



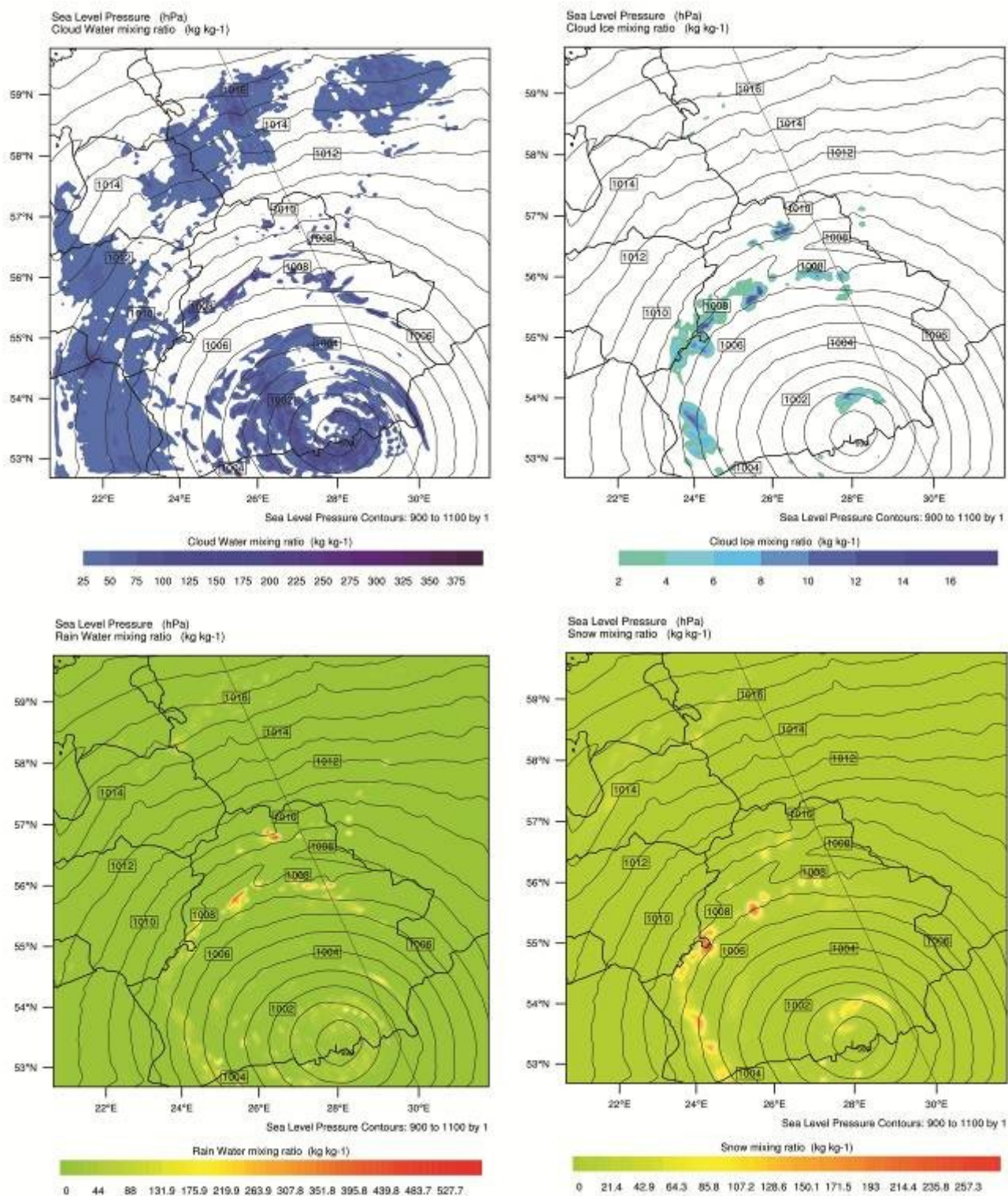
Мал. 45. Значенні показникаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №7 з уключанай функцыяй дэмпфавання



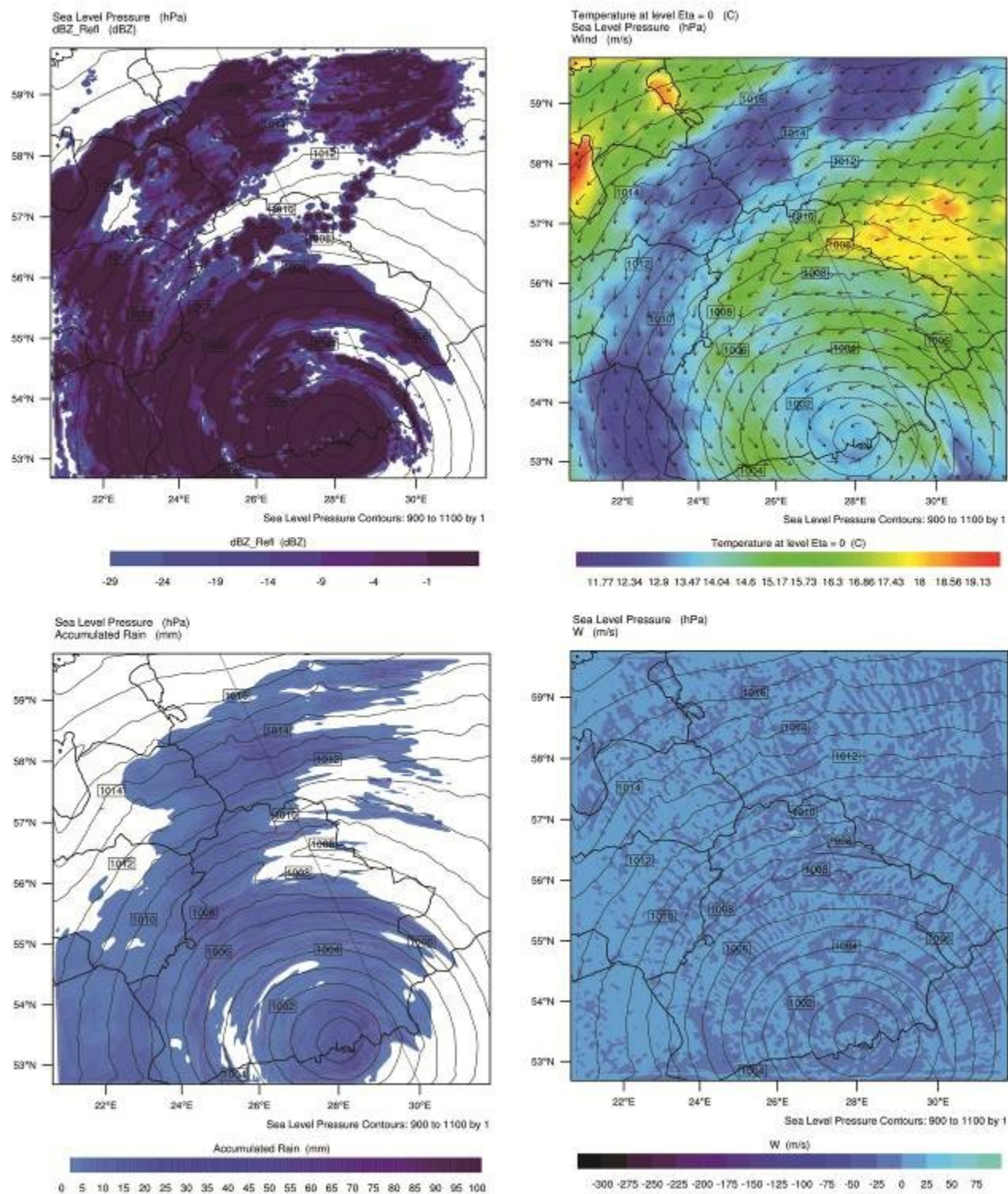
Мал. 46. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалыніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №7 з уключанай функцыяй дэмпфавання



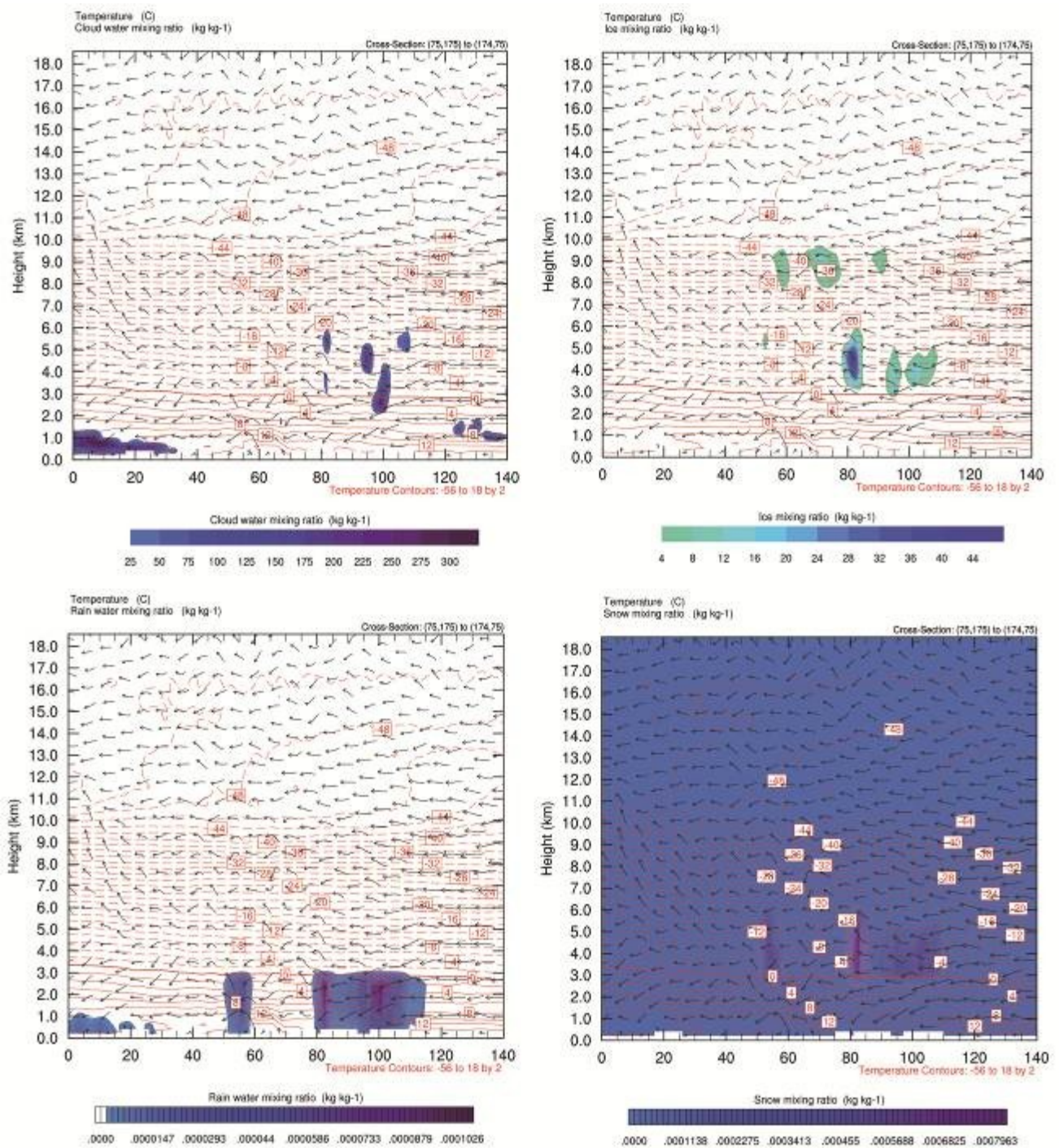
Мал. 47. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і сьнега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №7 з уключанай функцыяй дэмпфавання



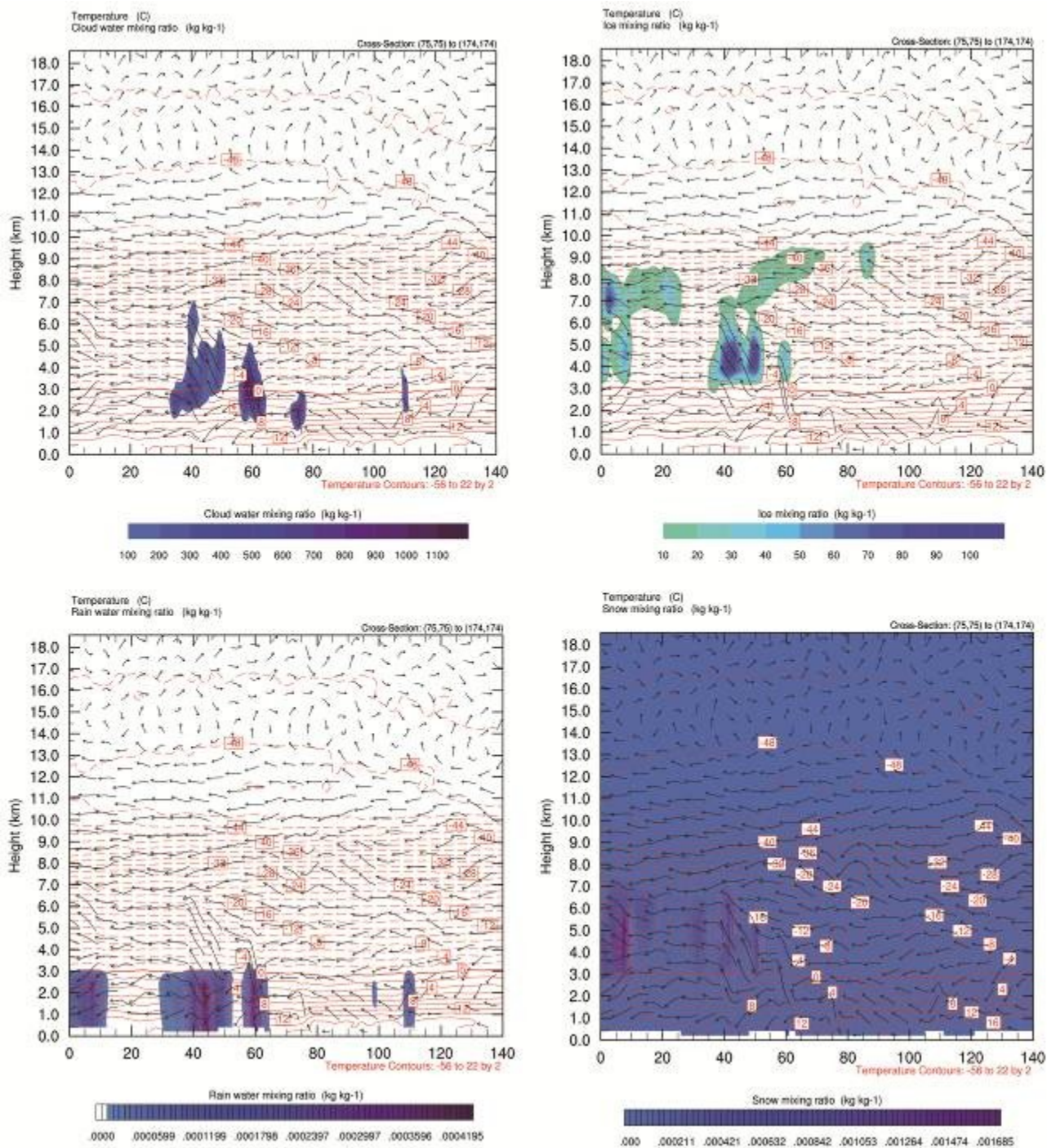
Мал. 48. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9



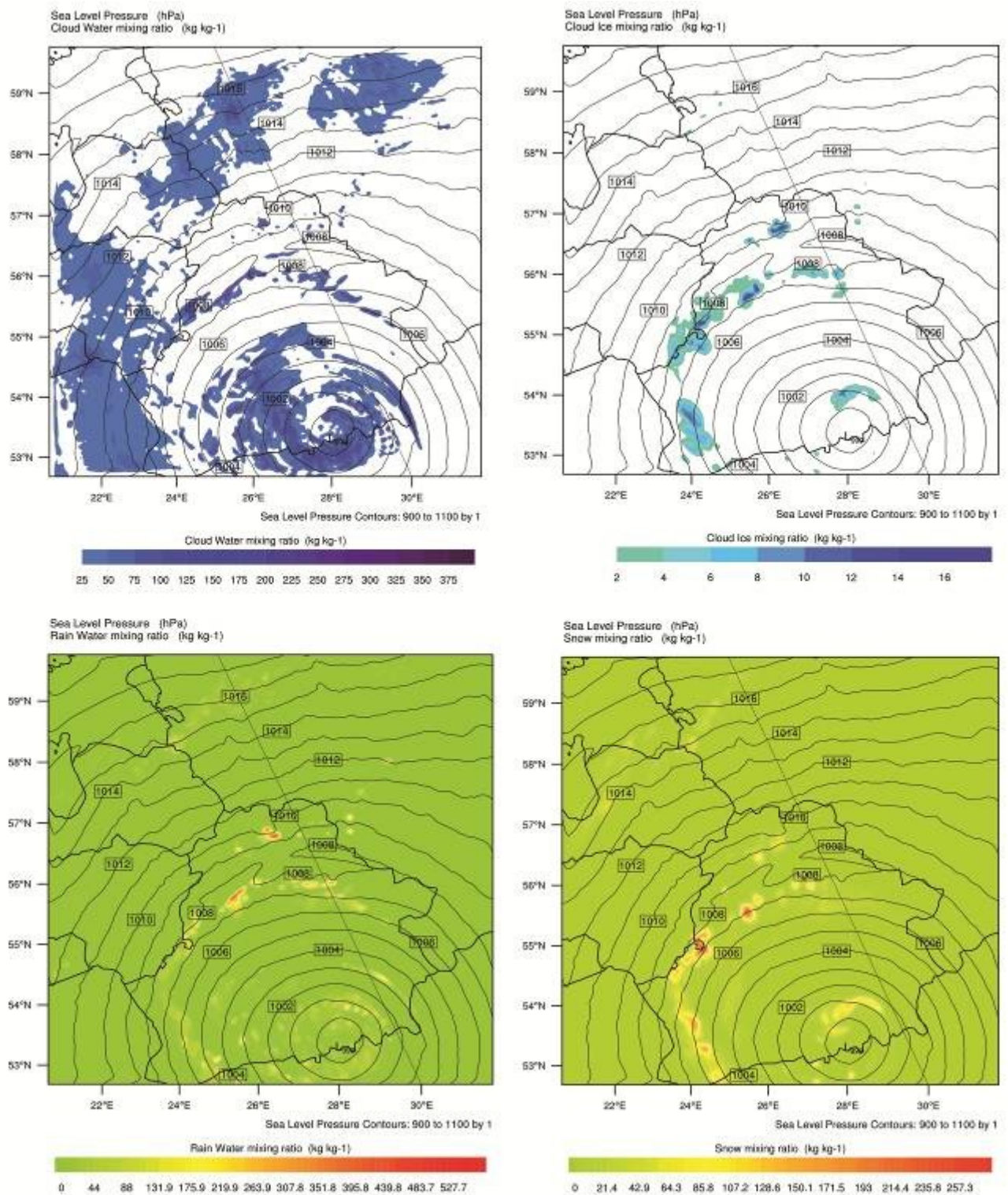
Мал. 49. Значенні показникаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9



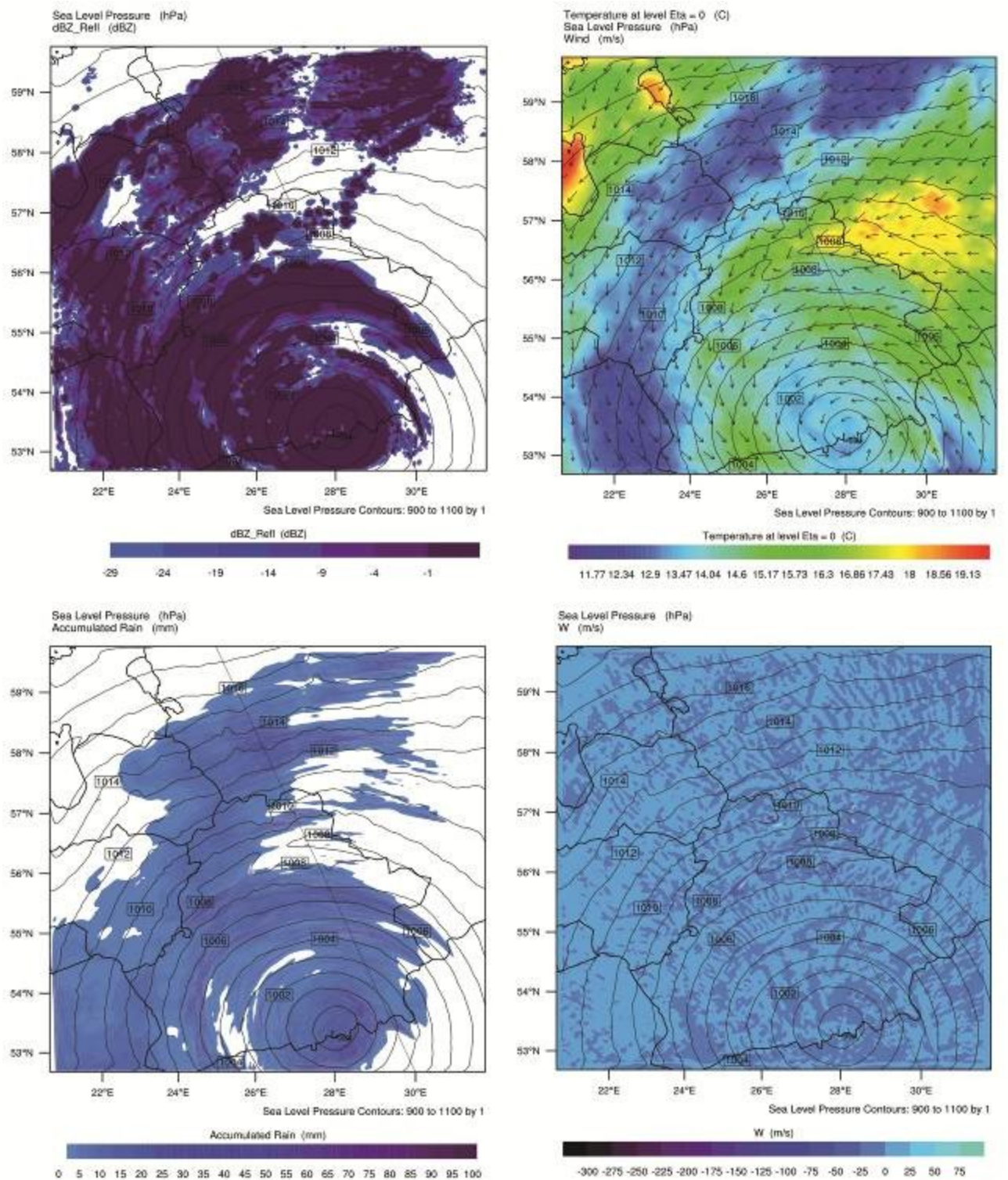
Мал. 50. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9



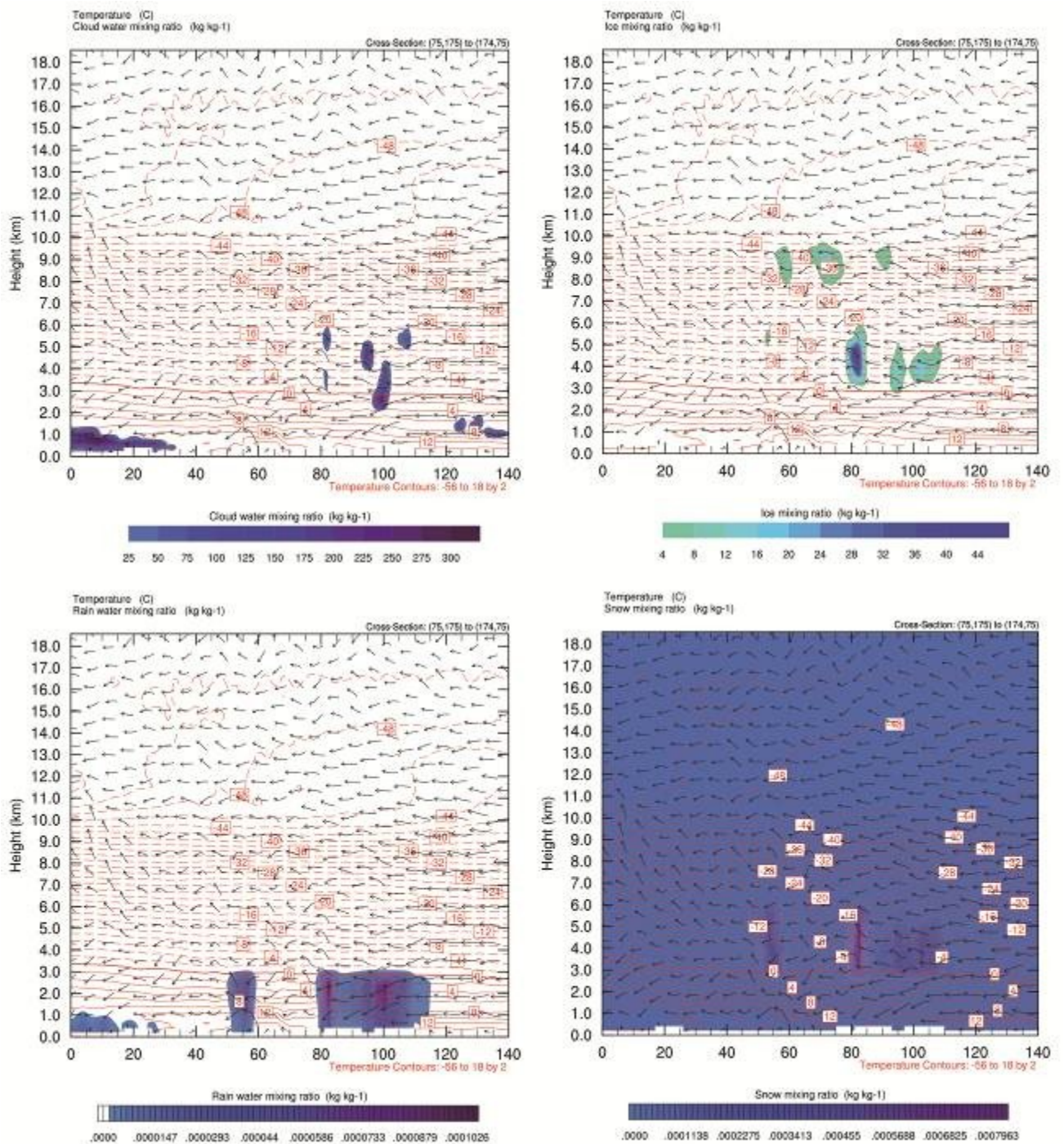
Мал. 51. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лінії паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9



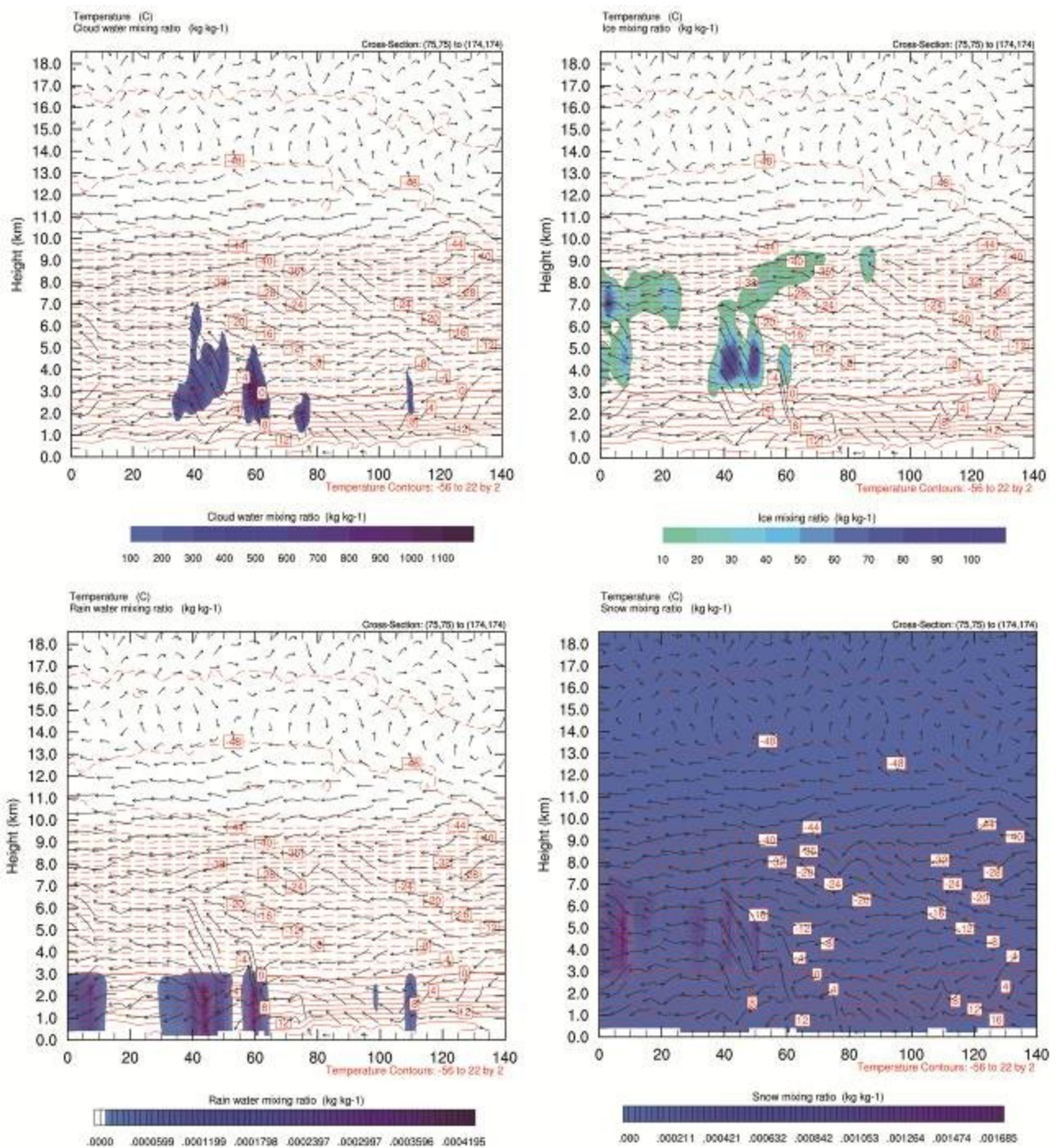
Мал. 52. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалыніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9 з уключанай функцыяй дэмпфавання



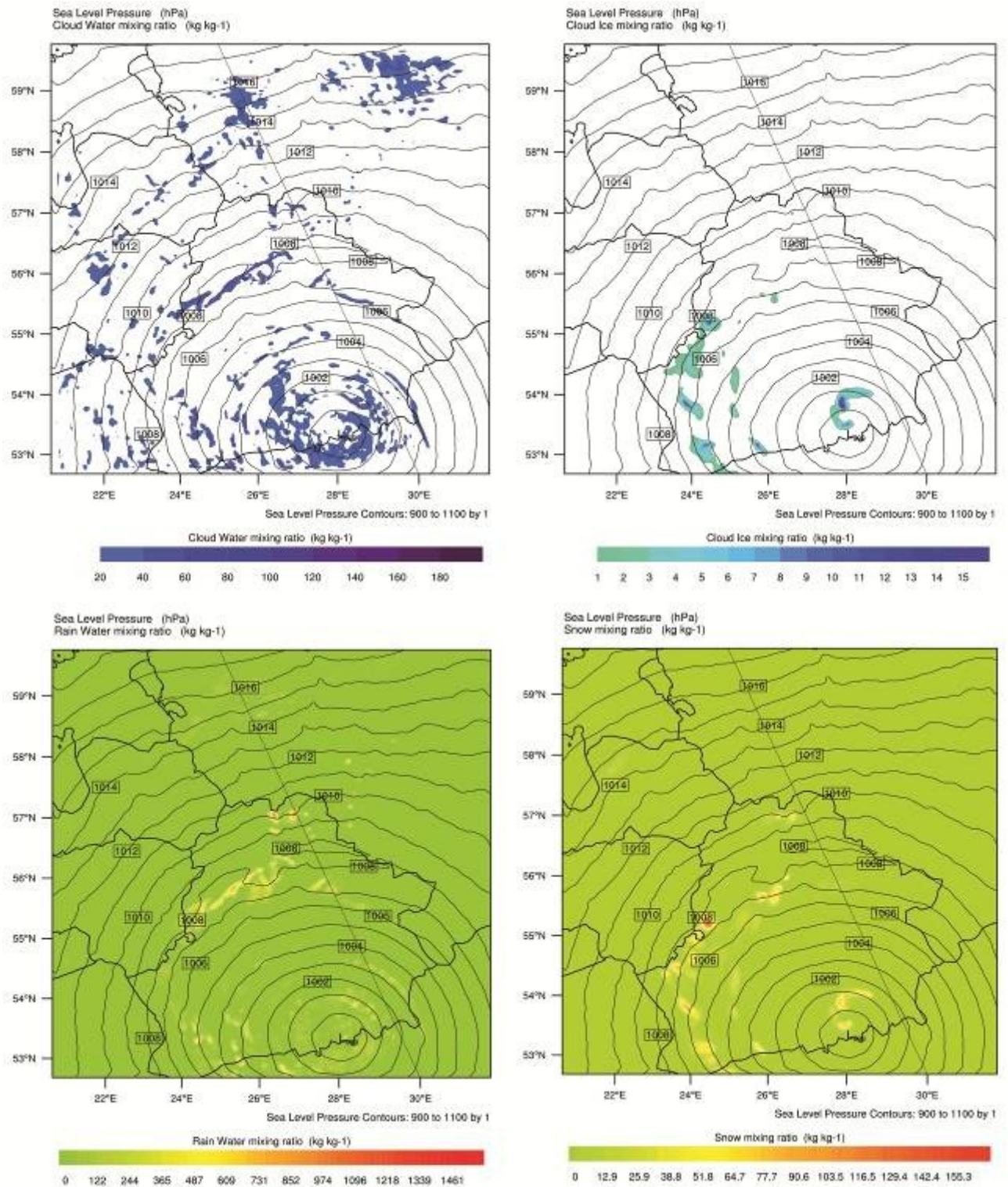
Мал. 53. Значенні показчикаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9 з уключанай функцыяй дэмпфавання



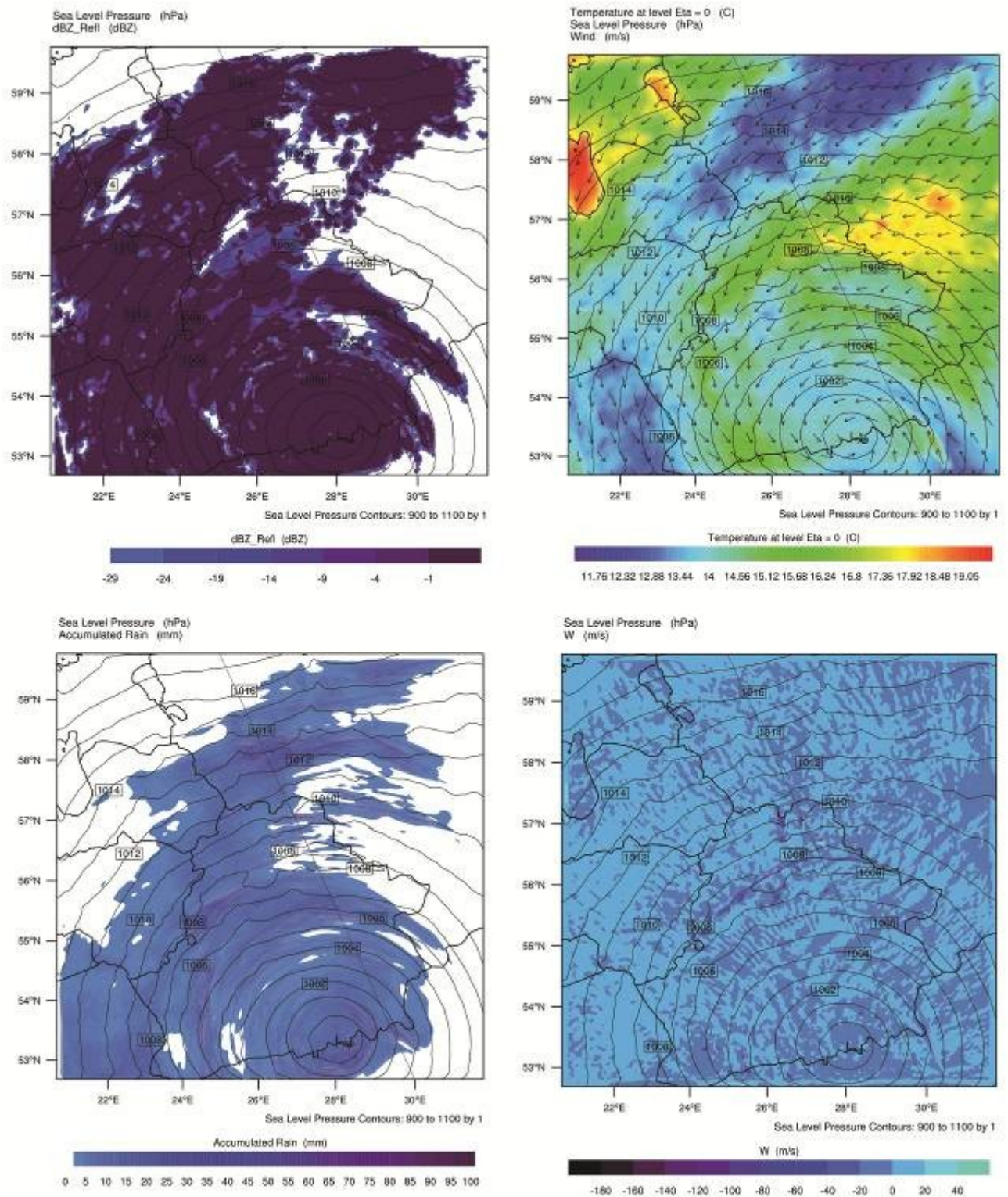
Мал. 54. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9 з уключанай функцыяй дэмпфавання



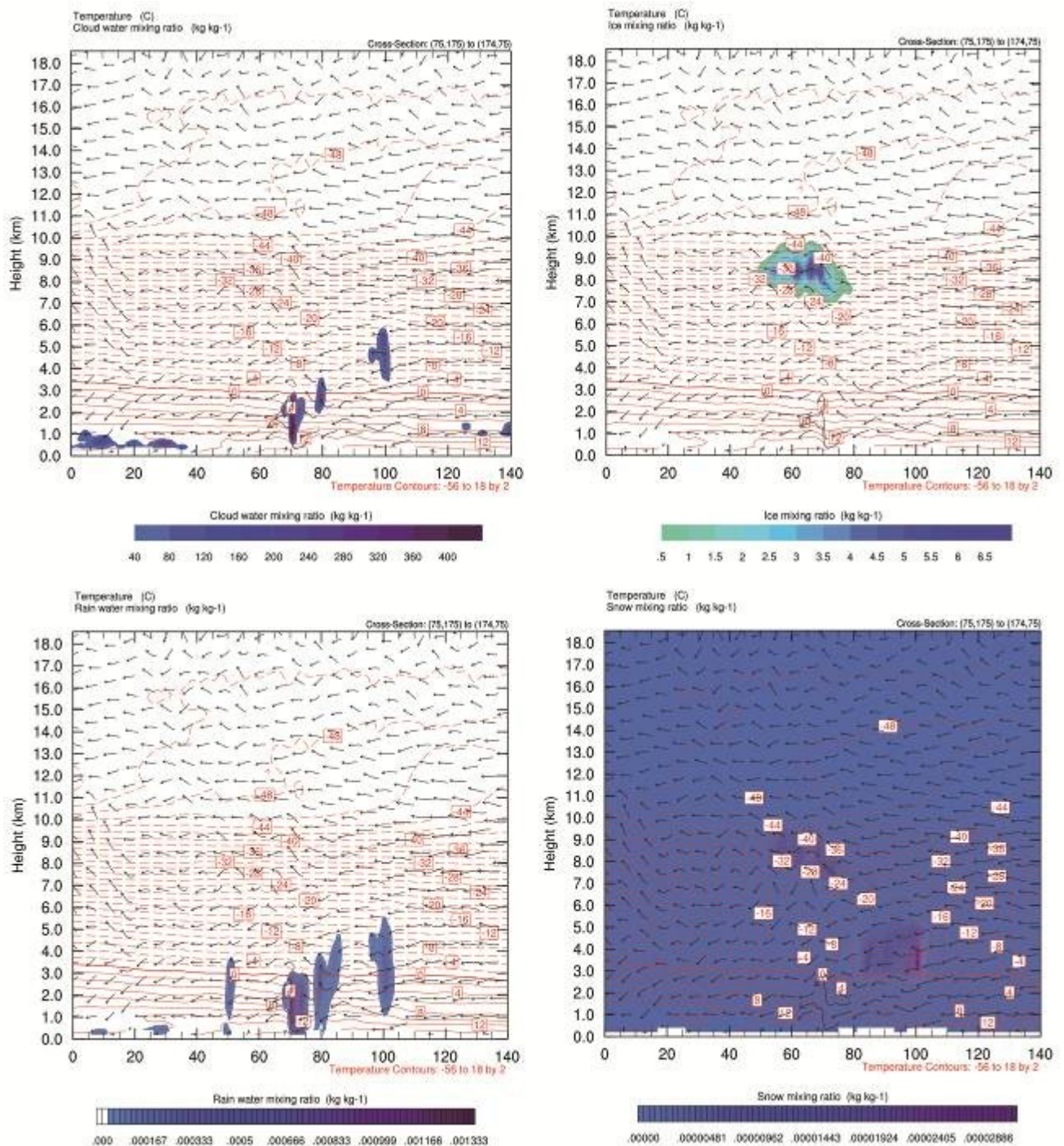
Мал. 55. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №9 з уключанай функцыяй дэмпфавання



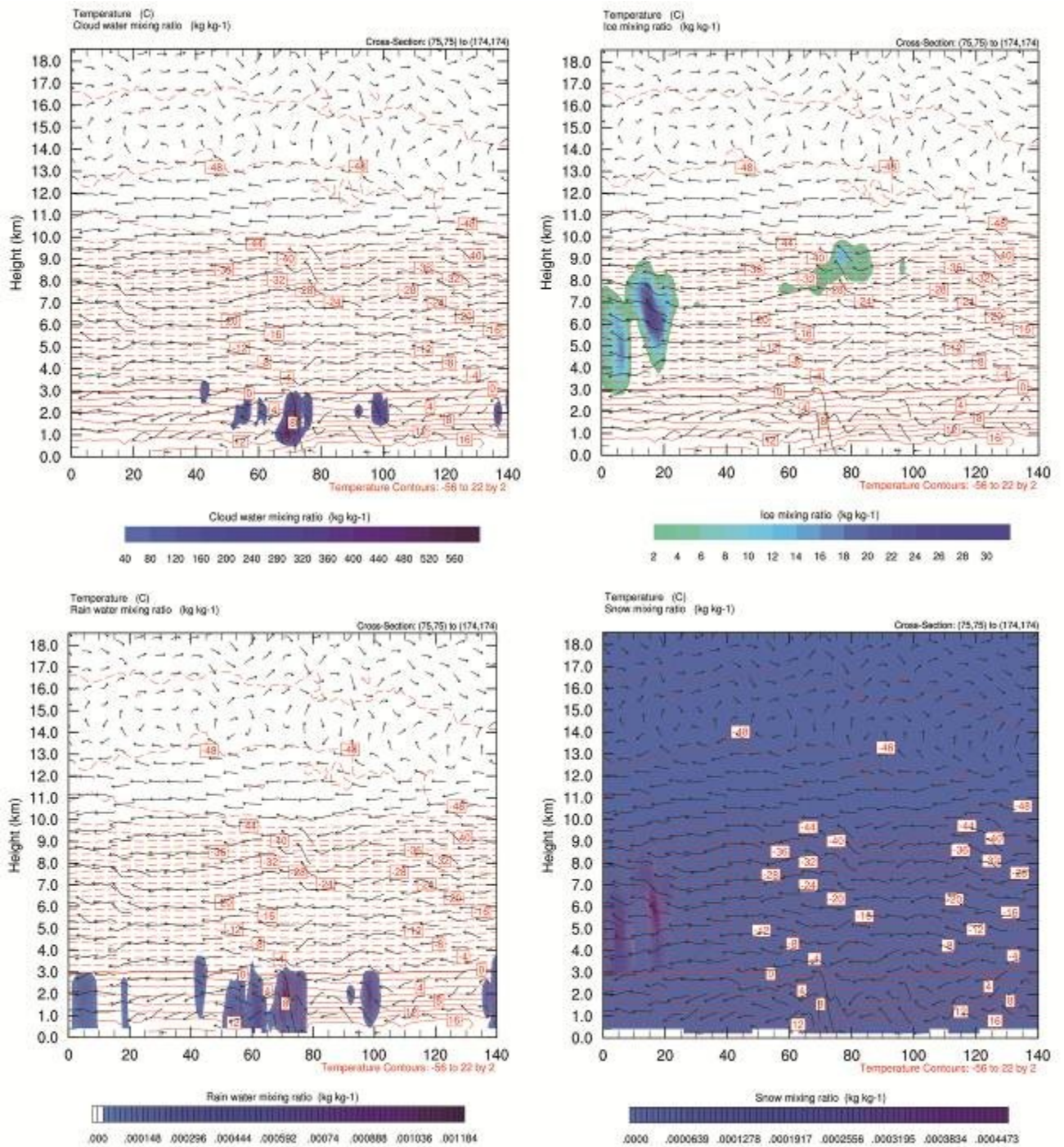
Мал. 56. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалыніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18



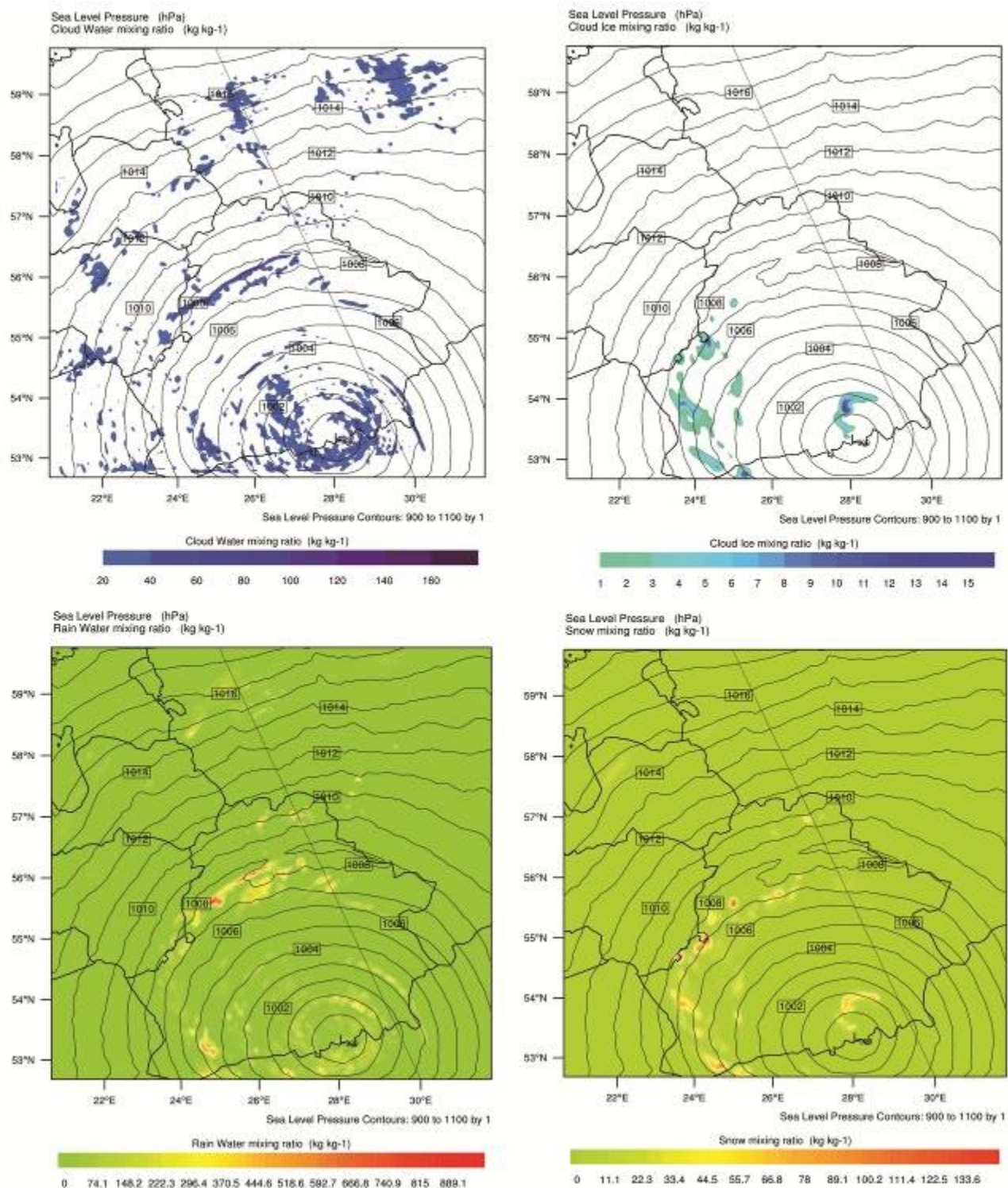
Мал. 57. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18



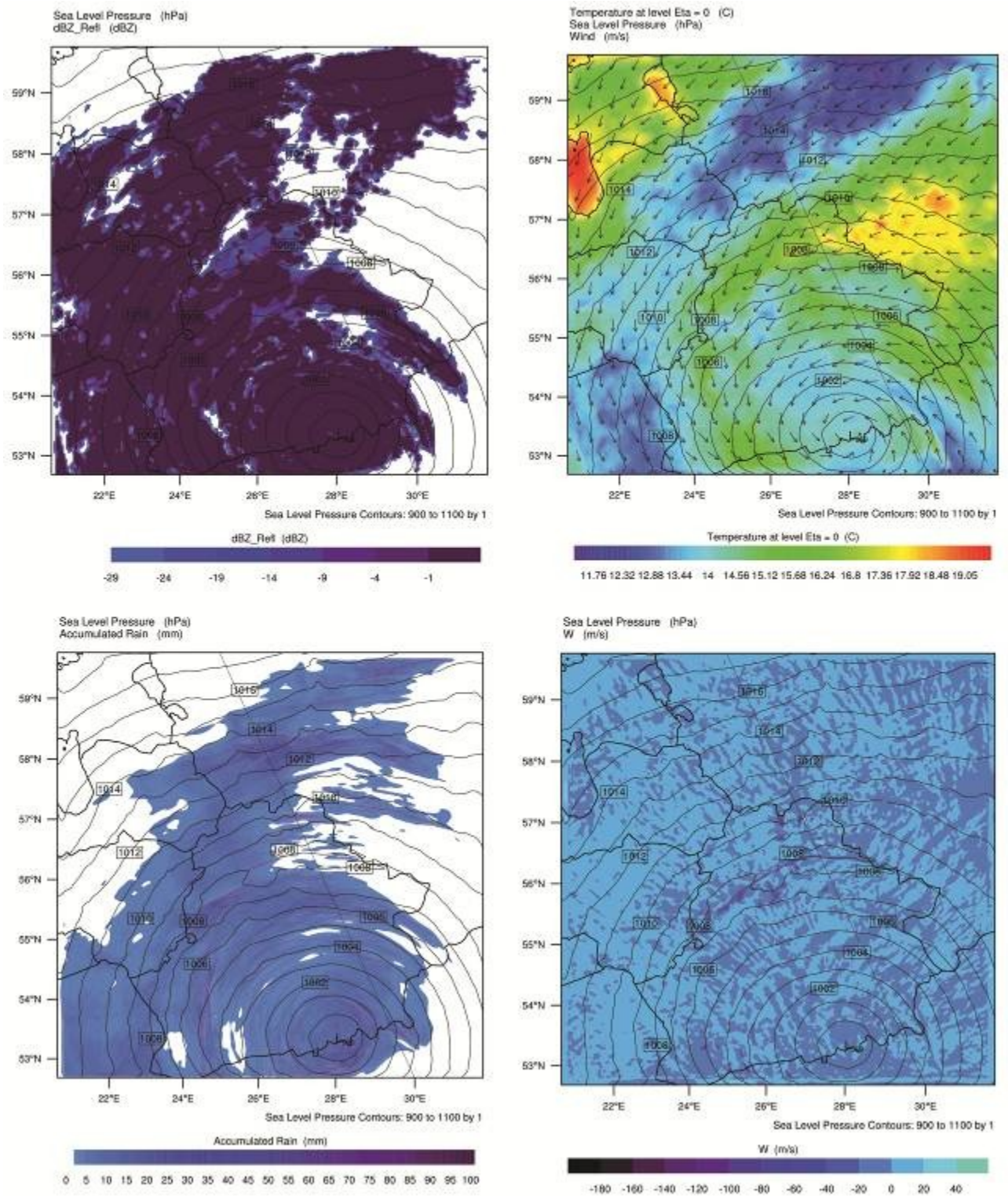
Мал. 58. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалыніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18



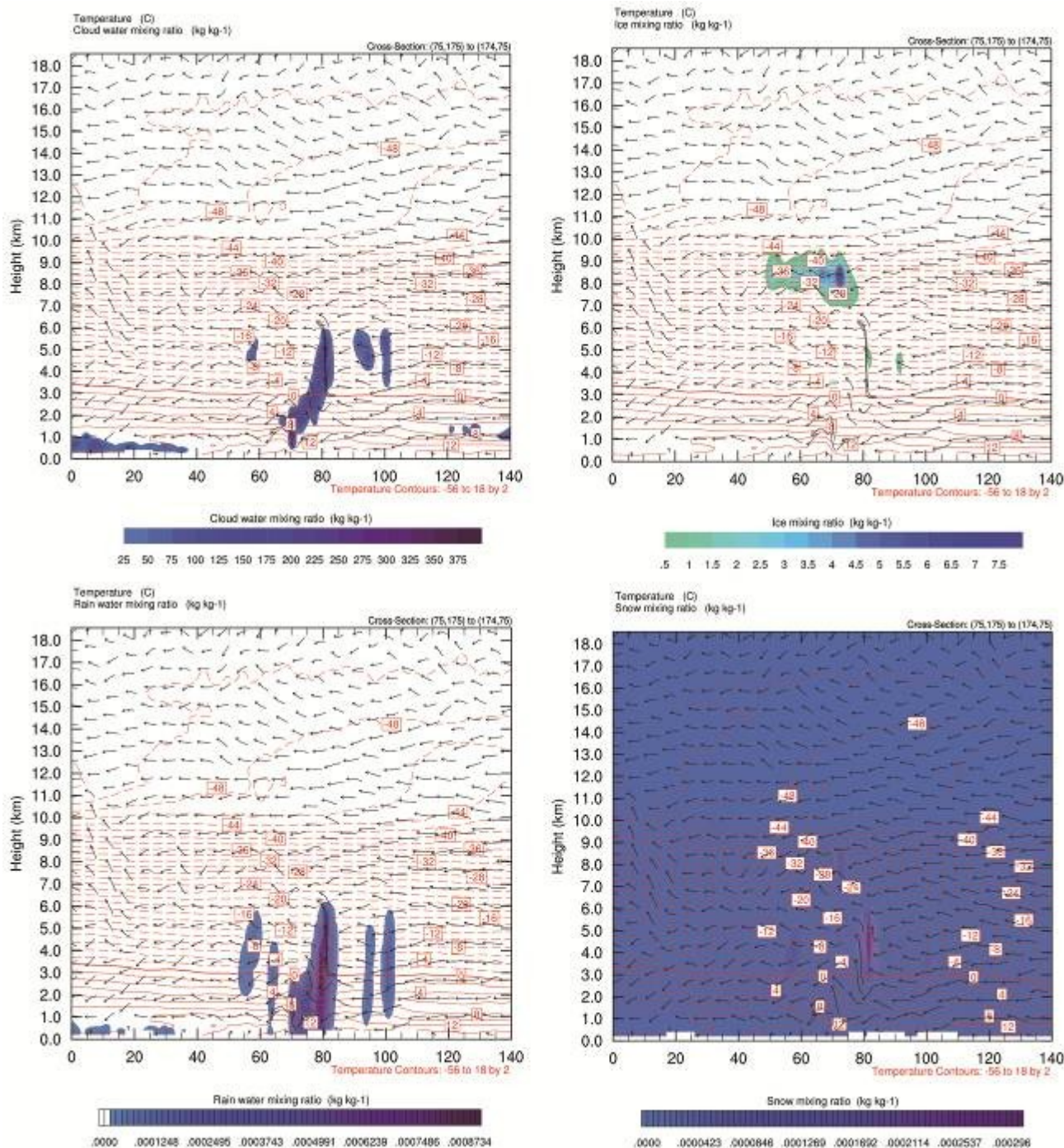
Мал. 59. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лініі паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18



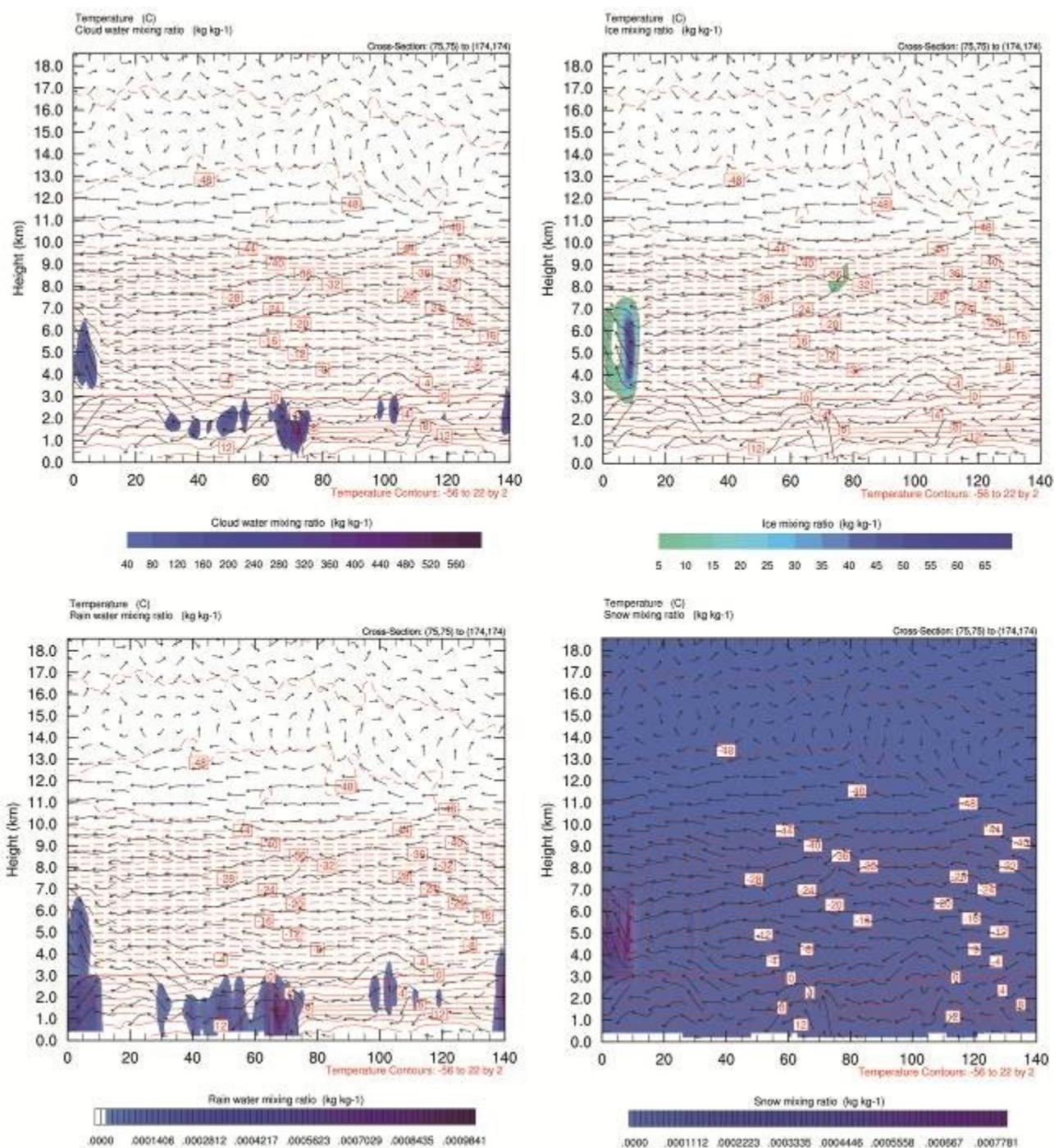
Мал. 60. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18 з уключанай функцыяй дэмпфавання



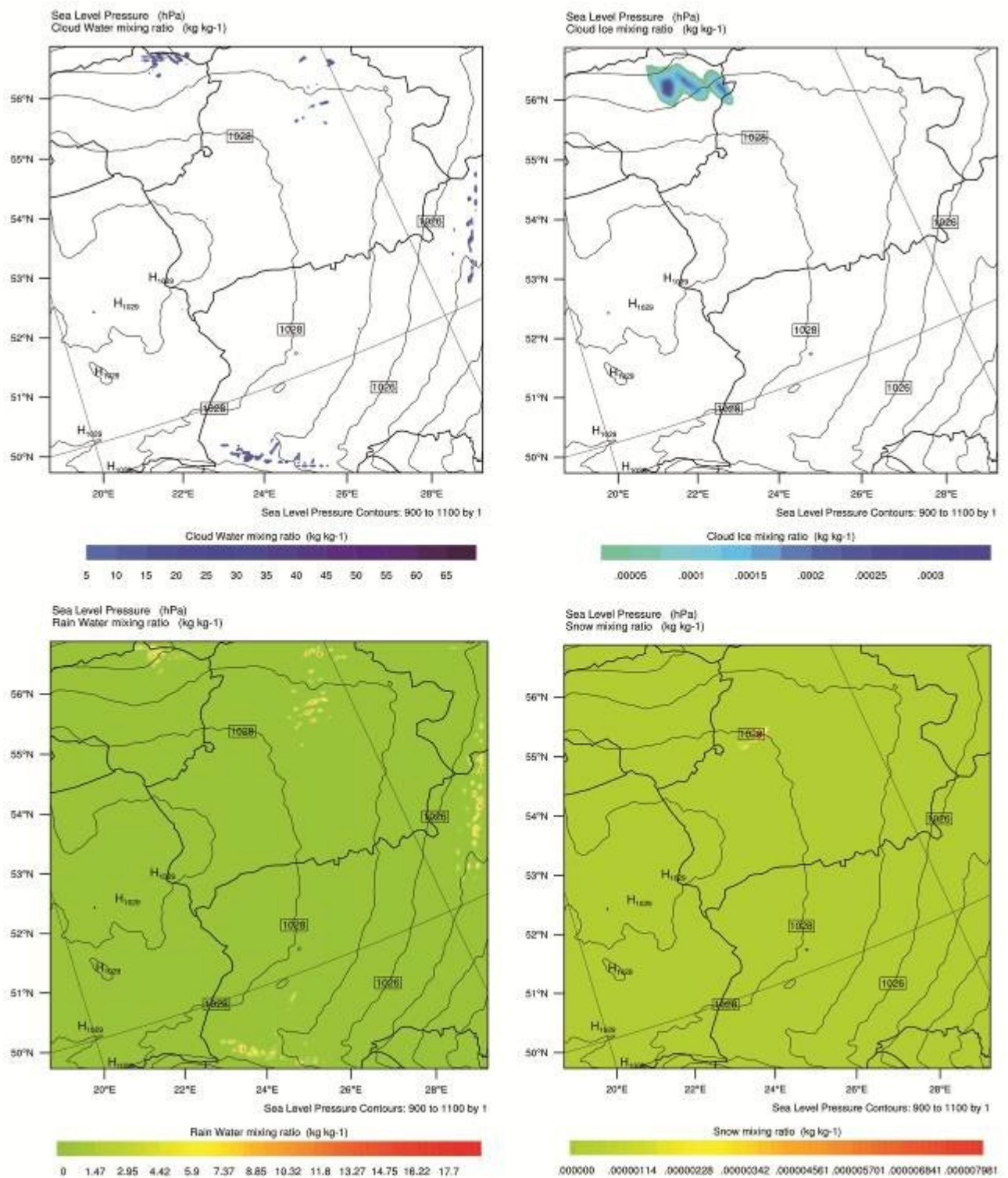
Мал. 61. Значенні показчикаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18 з уключанай функцыяй дэмпфавання



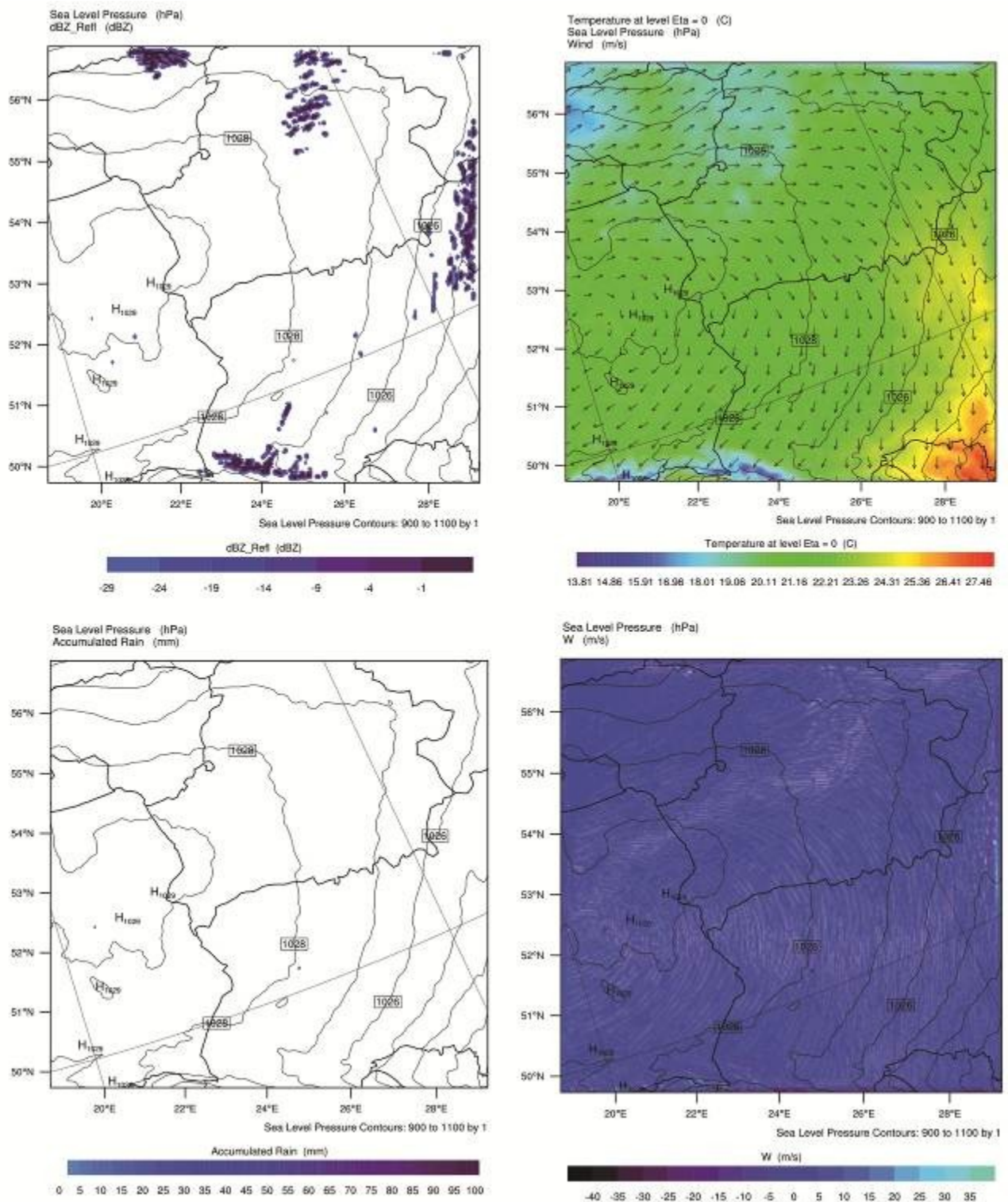
Мал. 62. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лінії паўночны захад – паўднёвы ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навалы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18 з уключанай функцыяй дэмпфавання



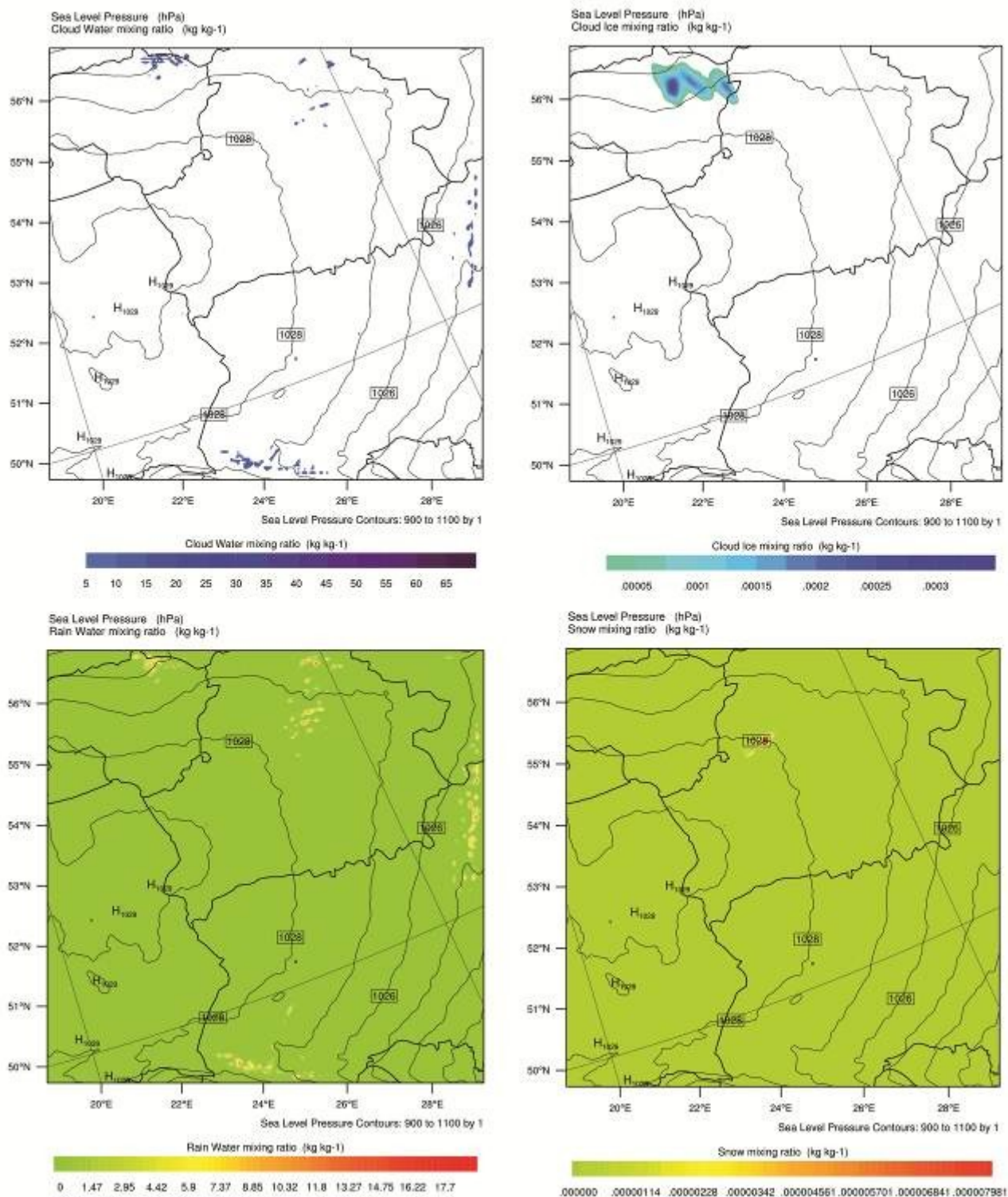
Мал. 63. Вертикальні розрізи (са значеннями суадносін сумесяў часцінак воблачных і дажджавых кропель, ледзяных крышталікаў і снега) па лінії паўднёвы захад – паўночны ўсход праз цэнтральную частку дамена для выпадка навальніцы ў Лепелі, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №18 з уключанай функцыяй дэмпфавання



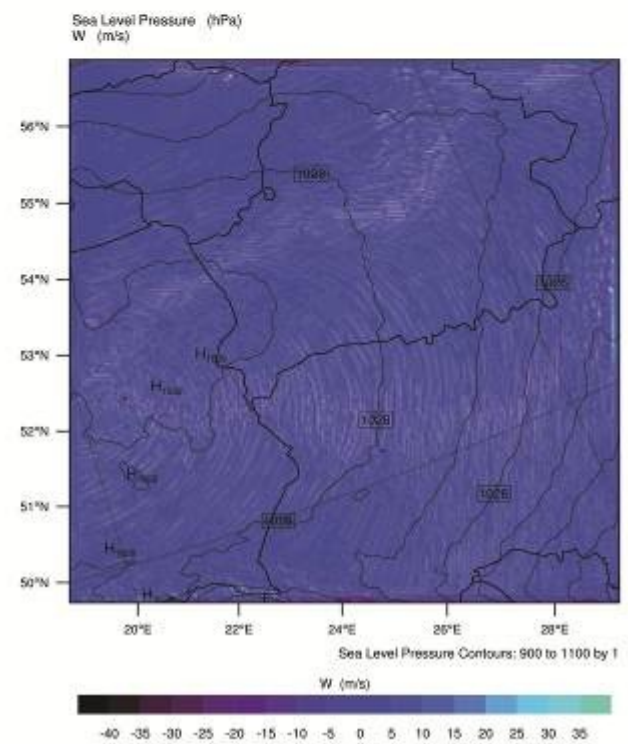
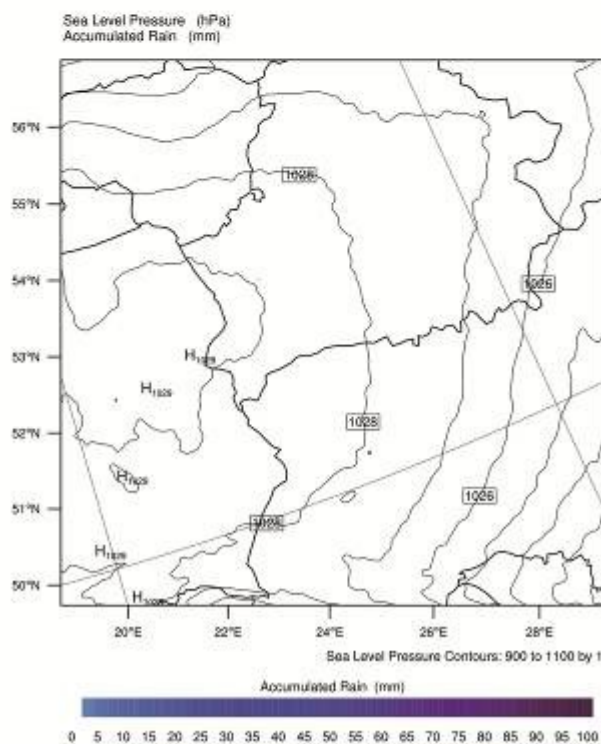
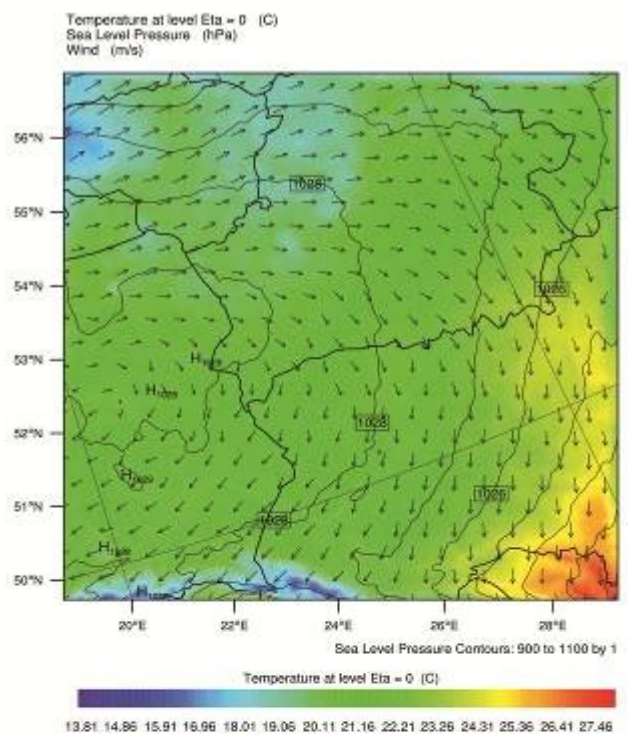
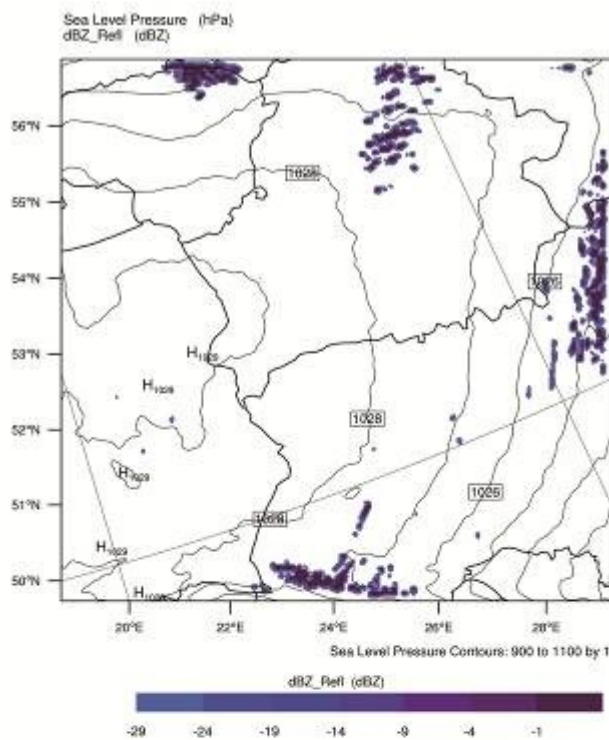
Мал. 64. Значэнні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навальніцы ў Пінску, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №17



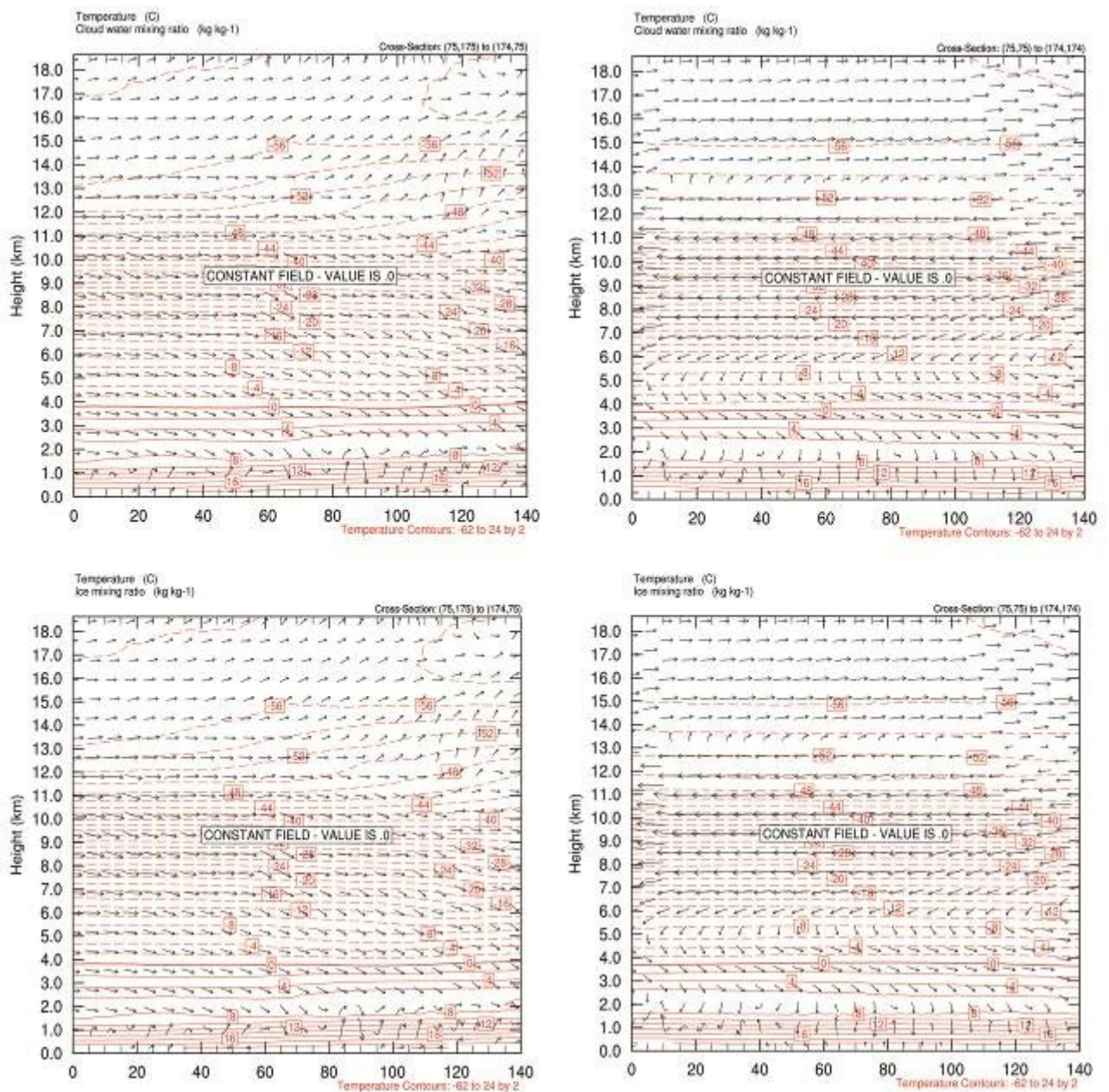
Мал. 65. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навалы ў Пінску, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №17



Мал. 66. Значенні суадносін сумесяў воблачных кропель, ледзяных крышталяў, дажджавых кропель і снега для выпадку навалніцы ў Пінску, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №17 з уключанай функцыяй дэмпфавання



Мал. 67. Значэнні паказчыкаў радыёрэха, тэмпературы прыпаверхневага слою, акумуляванай колькасці ападкаў і вертыкальных хуткасцяў ветра для выпадку навальніцы ў Пінску, атрыманыя пры ўжыванні разліковай схемы №17 з уключанай функцыяй дэмпфавання



Мал. 68. Вертикальні розрізи для випадку навальниці ў Пінску па лінії паўночны захад – паўднёвы ўсход (левая) і паўднёвы захад – паўночны ўсход (права), атрыманыя пры выкарыстанні разліковай схемы №17 без (верхні рад) і з уключанай функцыяй дэмпфавання (ніжні рад) – у тэрмін не фікасавалася часцінак вільгаці ўвогуле, таму разрізы, зробленыя для адлюстравання колькасцяў розных часцінак, вільгаці былі аб'яднаны