

УДК 612.2

ВЗАИМОСВЯЗИ ИЗМЕНЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И РИТМА СЕРДЦА ЗИМОВЩИКОВ В АНТАРКТИКЕ: МОДЕЛЬНО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**Е. В. Моисеенко¹, А. Ю. Утевский², Т. П. Бондаренко², К. В. Носов², Ю. Г. Беспалов²**¹ *Национальный антарктический научный центр МОН Украины, г. Киев.**E-mail: moiseyenko@gmail.com*² *Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г. Харьков*

Реферат. Работа посвящена изучению возможности использования метода математического моделирования для анализа результатов синхронного мониторинга биомедицинских и метеорологических показателей в условиях длительной антарктической экспедиции украинских зимовщиков на станции «Академик Вернадский». Для моделирования использовалась база данных наблюдений за изменениями атмосферного давления и физиологическими параметрами персонала (11 мужчин в возрасте 23 – 48 лет) во время антарктической экспедиции. Показана возможность использования математических моделей (дискретных моделей динамических систем) для определения устойчивости регуляторных влияний вегетативной нервной системы человека к изменению атмосферного давления в условиях Антарктики. Получены результаты модельно-математического анализа, которые позволяют оценить уровень чувствительности механизмов регуляции сердечного ритма к действию изменений барометрического давления в течение антарктической зимовки.

Взаємозв'язки змін атмосферного тиску і ритму серця зимівників у Антарктиці: модельно-математичний аналіз.**Е. В. Мойсеєнко, А. Ю. Утевський, Т. П. Бондаренко, К. В. Носов, Ю. Г. Беспалов**

Реферат. Работа присвячена вивченню можливості використання методу математичного моделювання для аналізу результатів синхронного моніторингу біомедичних і метеорологічних показників в умовах тривалої антарктичної експедиції українських зимівників на станції «Академік Вернадський». Для моделювання використовувалася база даних спостережень за змінами атмосферного тиску і фізіологічними параметрами персоналу (11 чоловіків у віці 23 – 48 років) під час антарктичної експедиції. Показана можливість використання математичних моделей (дискретних моделей динамічних систем) для визначення стійкості регуляторних впливів вегетативної нервової системи людини до змін атмосферного тиску в умовах Антарктики. Отримано результати модельно-математичного аналізу, які дозволяють оцінити рівень чутливості механізмів регуляції сердечного ритму до дії змін барометричного тиску протягом антарктичної зимівлі.

Relationships of changes of atmospheric pressure and heart rate in winterers in antarctica: mathematical modelling and analysis.**Moiseyenko E. V., Utevsy A. Yu., Bondarenko T. P., Nosov K. V., Bespalov Yu. G.**

Annotation. This research is aimed at estimating the power of mathematical modeling for analyzing results of the simultaneous monitoring of biomedical and meteorological indications during a long Antarctic expedition at the Antarctic station “Akademik Vernadsky”. The database of atmospheric pressure and personnel physiological parameters during the Antarctic expedition (11 men aged 23 – 48 years) were used. We showed the possibility of using mathematical models (discrete models of dynamic systems) for determining the sustainability of regulatory influences of the autonomic nervous system to a change in atmospheric pressure in the Antarctic. The results of our model-mathematical analysis allows to evaluate the level of sensitivity of regulation mechanisms of cardiac rhythm to the action of changes in barometric pressure during the Antarctic wintering.

Key words: atmospheric pressure, heart rate, mathematical modeling, winterers, Antarctic.

Введение

Наблюдающиеся в настоящее время глобальные климатические и экологические перемены усиливают актуальность решения проблем негативного влияния метеоусловий на организм человека. Научная литература изобилует примерами установленных взаимосвязей клинических обострений хронической патологии человека с изменениями метеорологических факторов. Давно известно существование контингента метеозависимых и среди практически здоровых людей. Однако дефицит знаний механизмов негативного влияния конкретных метеофакторов на функции организма и недостаток объективных методов оценки степени реакций организма на действие экстремальных метеоусловий не позволяют разработать достаточно эффективную систему профилактики и повышения адаптационных резервов. Эта проблема особенно актуальна в приполярных областях нашей планеты, где всегда имевшее место экстремальное влияние метеоусловий на организм человека усиливается в настоящее время. Это связано с глобальными климатическими изменениями, проявляющимися больше в высоких широтах. При этом показано, что адаптивные сдвиги в организме в результате длительного влияния приполярных условий всегда отражаются в изменениях функционирования системы кровообращения и многоуровневых перестройках механизмов регуляции ритмичной деятельности сердца. В связи с этим исследование влияния метеоусловий на сердечный ритм и его регуляторные механизмы при участии антарктических зимовщиков позволяет выявить особенности функциональных перестроек в динамике, что представляют значительный практический и теоретический интерес.

В ходе синхронного сбора информации о динамике метеофакторов и показателей сердечной деятельности человека в Антарктике регистрируется огромное количество данных, которые требуют программно-математической обработки. Здесь решение поставленных задач во многом зависит от адекватности применения технологий обработки, анализа и оценивания результатов исследования. Использование традиционных методов статистической обработки в данном случае не всегда позволяет сделать качественную оценку полученных результатов. Для конкретных условий оказалось возможным применение специальных методов математического моделирования. К примеру, устойчивость систем разной природы связывается с наличием в них отрицательных обратных связей между компонентами системы, обеспечивающих функционирование механизмов гомеостаза [1]; притом особенно велика роль внутрикомпонентных отношений типа «минус-минус», например, внутривидовой конкуренции в сообществах живых организмов [1, 2]

Поэтому цель исследования заключалась в изыскании возможности оценки влияния антарктических метеоусловий на деятельность сердца человека путем использования метода математического моделирования для анализа результатов синхронного мониторинга биомедицинской и метеорологической информации в условиях длительной антарктической экспедиции украинских зимовщиков на станции «Академик Вернадский».

Материал и методика

При исследовании вегетативной нервной системы, как и других регуляторных систем человеческого организма, представляется эффективным использование методических подходов, позволяющих непосредственно увидеть систему обратных связей, определяющую характер гомеостаза динамических систем различной природы. Такую возможность дает разработанный на биологическом и механико-математическом факультетах Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (ХНУ) новый класс математических моделей — дискретных моделей динамических систем (ДМДС), с использованием которого было проведено моделирование поведения систем самой различной природы [8–11, 13–14].

ДМДС базируется на теории динамических систем и позволяет на основании эмпирических данных (статистического массива) выявить структуру отношений между компонентами некоторой динамической биологической или экологической системы. Предполагается, что между компонентами могут существовать парные отношения вида «+,+», «-, -», «+,-», «-,+», «+,0», «-,0», «0,0», используемые в биологии и экологии [12]. Предполагается, что могут существовать внутрикомпонентные отношения — эффекты воздействия компонента на самого себя, которые должны быть симметричными, т. е. типа «+,+», «-, -», «0,0». Имеются разные подходы к идентификации структуры отношений системы [13, 14]. Для данного исследования был выбран подход, основанный на принципах закона Либиха. Количество уровней каждого компонента полагалось равным трем — низкое (1 балл), среднее (2 балла), высокое (3 балла). Наряду со структурой отношений ДМДС также позволяет получить траекторию системы, т. е. увидеть поведение системы в динамике. Предметом настоящей

работы является описание с помощью ДМДС системных проявлений воздействия антарктических метеоусловий на состояние вегетативной нервной системы (ВНС) человека.

Построение ДМДС осуществлялось с помощью АРМ, созданном в ХНУ имени В. Н. Каразина в рамках темы 1-16-10, № госрегистрации 0110U001433. В качестве типа корреляций была выбрана корреляция Пирсона, предназначенная для описания линейных зависимостей, в частности, для исследуемых параметров сердечно-сосудистой системы. Для моделирования использовались материалы наблюдений за метеоусловиями и физиологическими параметрами персонала во время антарктической экспедиции 2011–2012 гг. Обследовались (за период с апреля по октябрь 2011 года) 11 антарктических зимовщиков станции «Академик Вернадский» мужского пола в возрасте 23–48 лет. Для оценки функционального состояния сердца при помощи аппаратно-программного комплекса «Ритмограф» у каждого зимовщика врач станции ежемесячно один раз в два дня утром в спокойном состоянии регистрировал ритмокардиограмму во втором стандартном отведении. Математический анализ variability сердечного ритма (BCP) проводился с использованием методов вариационной ритмографии и с дополнительным расчетом других показателей, характеризующих динамику сердечного ритма. Определялись показатели: средняя продолжительность кардиоинтервалов (RRNN) и обратная величина — средняя частота ритма (RRNN); стандартное отклонение полного массива кардиоинтервалов (SDNN), нормированная мощность спектра низкочастотного компонента BCP (LF_{norm} — относительный уровень активности вазомоторного центра), удельная нормированная мощность дыхательных волн (HF_{norm}), что характеризует активность парасимпатического отдела ВНС, индекс Баевского (ИН — уровень напряжения компенсаторных механизмов организма, уровень функционирования центрального контура регуляции сердечного ритма) [3–7]. Для моделирования использовались следующие вариационно-пульсометрические показатели: мода (Mo), амплитуда моды (АМО), вариационный размах (ΔX), традиционно используемых в методике Баевского [3–6], дополненные показателем LF/HF, отражающим соотношения симпатической и парасимпатической регуляции. По результатам математического моделирования с применением ДМДС данных за два месяца (апрель и октябрь) формировались рабочие гипотезы относительно системных факторов, определяющих чувствительность вегетативной нервной системы к метеорологическим факторам. Эти гипотезы проверялись путем определения значений корреляции по Спирмену (ранговый характер которой соответствует задаче сравнения динамики таких разнородных показателей, как физиологические и метеорологические) между значениями предлагаемых в соответствии со смыслом гипотез системных показателей состояния ВНС и значений динамики метеорологического параметра — атмосферного давления, оказывающего влияние на человеческий организм.

Результаты исследований и их обсуждение

Для построения модельных исследований использовались результаты мониторинга данных за два месяца (апрель и октябрь), которые отражают периоды срочной адаптации и длительной адаптации человека к антарктическим условиям.

Графы отношений, соответствующие апрельским и октябрьским сериям наблюдений представлены на рис. 1 и рис. 2. (Далее — апрельский и октябрьский графы).

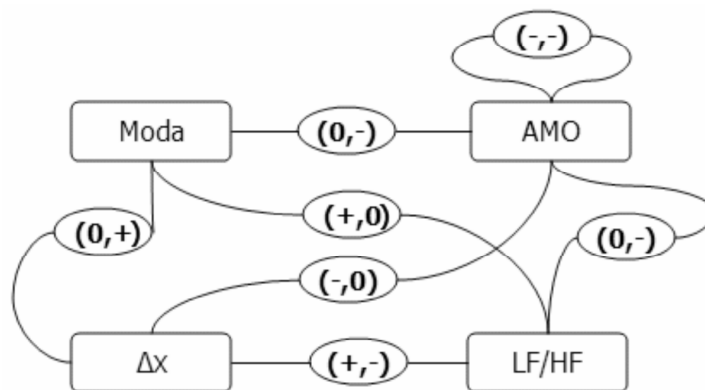


Рис.1. Граф отношений, соответствующий апрельской серии наблюдений.

Знак соответствующего влияния находится в овале на линии, ближе к прямоугольнику, в котором отображен компонент — объект этого влияния (например, отношение (+,-) между ΔX и LF/HF означает, что ΔX отрицательно влияет на LF/HF, в то время как LF/HF положительно влияет на ΔX).

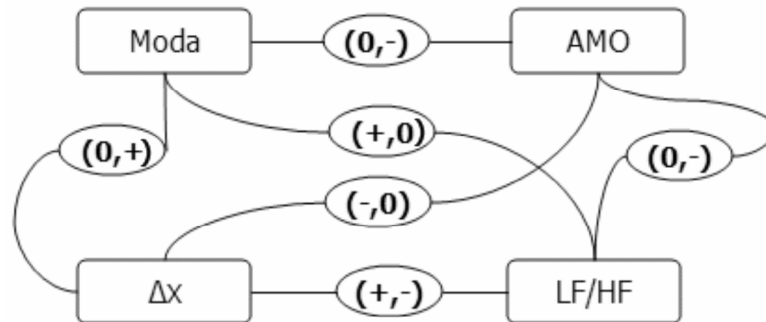


Рис. 2. Граф отношений, соответствующий октябрьской серии наблюдений. (Обозначения, как и на рис. 1.)

Траектории системы, соответствующие апрельским и октябрьским сериям наблюдений представлены в табл. 1 и табл. 2. (Далее соответственно — апрельская и октябрьская траектории системы).

Таблица 1.

Траектории системы, соответствующая апрельской серии наблюдений.

Moda	1	1	1	1	1	2	2	1	1
AMo	2	2	1	1	1	1	1	1	2
ΔX	1	1	1	2	3	3	3	2	1
LF/HF	2	3	3	3	3	2	1	1	1
Условные шаги по времени	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 2.

Траектория системы, соответствующая октябрьской серии наблюдений.

Moda	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1
AMo	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2
ΔX	1	2	3	3	3	2	1	1	1	1
LF/HF	3	3	3	2	1	1	1	2	3	3
Условные шаги по времени	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Структуры графов отношений двух указанных серий очень схожи (рис. 1 и рис. 2). Отличие заключается лишь в наличии в апрельском графе отношения типа «минус-минус», дополнительно регулирующего значение AMo, которое отсутствует в октябрьском графе.

Это различие проявляется и в различиях структуры траекторий отношений — в октябрьской траектории в цикле присутствуют шаги (8, 9) с максимально высоким (3 балла) значением AMo при максимально низких (1 балл) значениях Mo. В апрельской траектории системы такие различия в значениях AMo и Mo в цикле отсутствуют.

На основании таких результатов математического моделирования с использованием ДМДС можно, с учетом положений о значении для гомеостаза системы отрицательных обратных связей, сформулировать следующую рабочую гипотезу:

— «октябрьская» структура отношений между параметрами, связанными с состоянием ВНС, характеризующаяся меньшим количеством отрицательных обратных связей, должна быть менее устойчивой;

— проявлением этих особенностей «октябрьской» структуры является наличие в цикле траектории системы шагов с высокими значениями АМо при низких Мо;

— соотношение значений АМо и Мо может быть использовано как диагностический признак, указывающий на низкую устойчивость ВНС.

При проверке этой рабочей гипотезы использовался показатель R, характеризующий различия значений АМо и Мо в устойчивой «апрельской» и неустойчивой «октябрьской» структурах. R рассчитывается по формуле:

$$R = Mo/10 - AMo.$$

Для оценки чувствительности ВНС к изменению атмосферного давления вводился показатель F, представляющий собой частное от деления значения индекса Баевского (ИН) на изменение давления. Динамика показателей F и R для отдельных участников экспедиции Н., Б. и В. представлена на рис. 3, 4, 5.

Во всех трех случаях, иллюстрируемых рис. 3–5, видно, что выраженные максимумы показателя F чувствительности ВНС к изменению барометрического давления наблюдаются в середине и ближе к концу зимовки. Со всеми этими максимумами наблюдаются совпадающие или близкие к ним по времени минимумы значений показателя R устойчивости ВНС (обратной зависимости не наблюдается, т.е. не всем выраженным минимумам R соответствует выраженным максимумы F). Этот визуально наблюдаемый на рисунках эффект может быть объяснен следующим образом. Необходимым условием повышения чувствительности организма к изменению давления является понижение устойчивости ВНС, но не всякое понижение устойчивости ВНС с необходимостью влечет за собой повышение чувствительности к изменениям давления, которое может зависеть и от других факторов. Для подтверждения статистической значимости этого визуально наблюдаемого на рисунках эффекта определялись значения корреляций Спирмена между значениями изменения давления и индекса Баевского в выборке, характеризующийся очень низкими значениями R и выборке, характеризующийся другими, более высокими значениями.

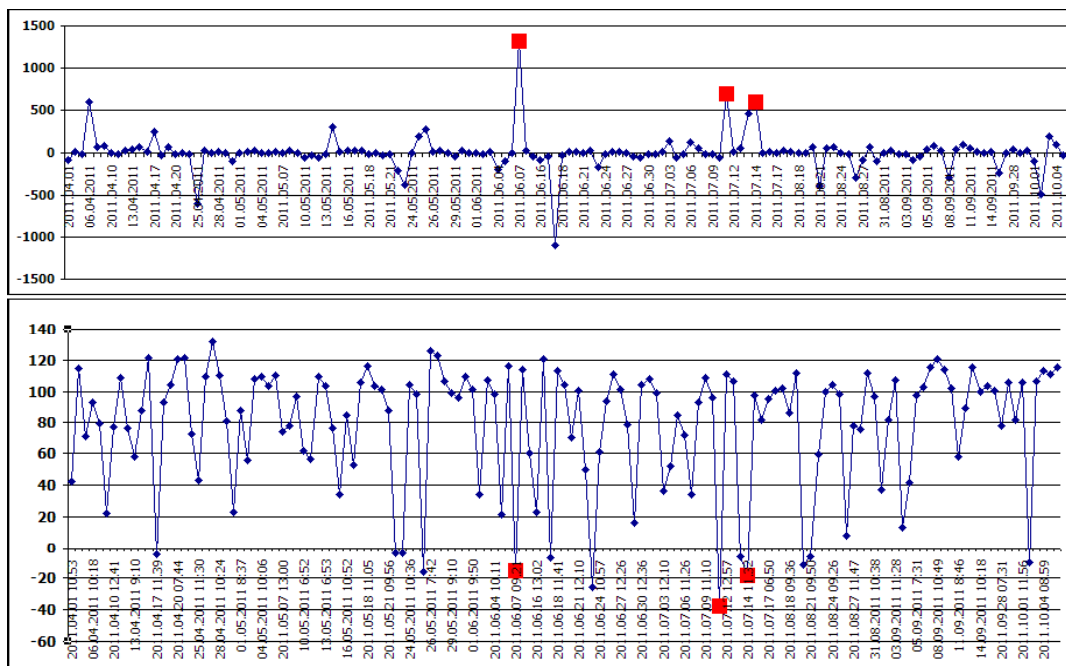


Рис. 3. Динамика F и R зимовщика Б. Масштаб абсцисс совпадает, разные графики в связи с разным масштабом показателей. Красные квадраты – максимумы чувствительности ВНС к изменению давления (показатель F) и совпадающие с ними или близкие по времени минимумы устойчивости ВНС (показателей R).

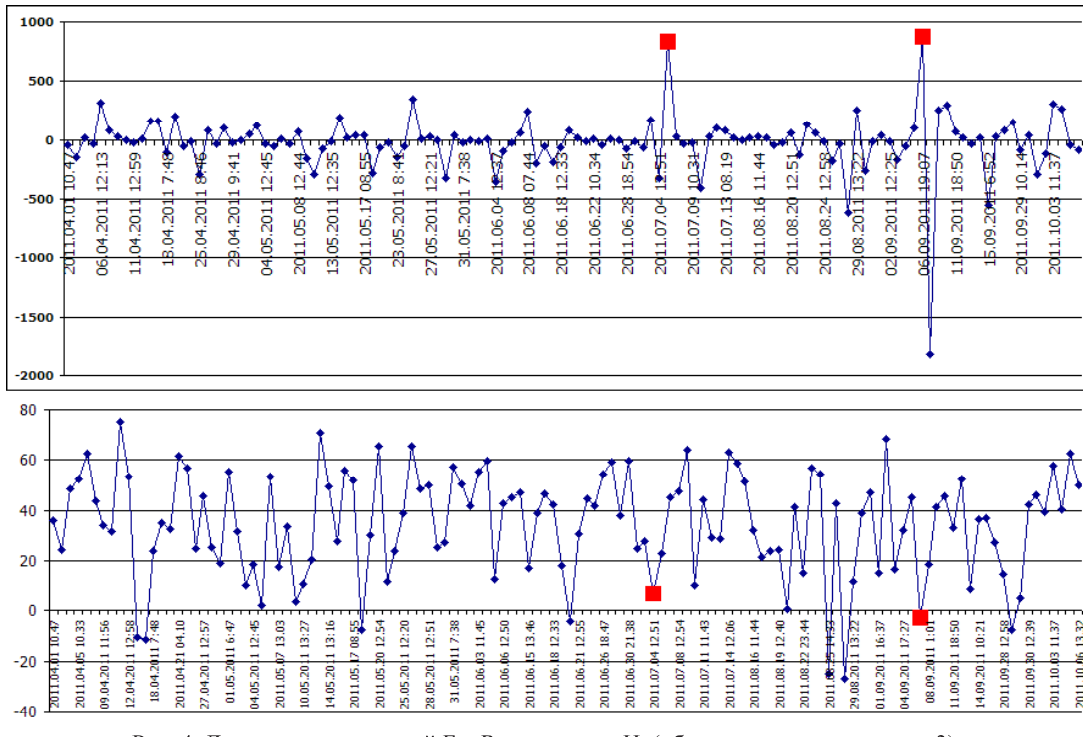


Рис. 4. Динамика показателей F и R зимовщика Н. (обозначения, как и на рис. 3).

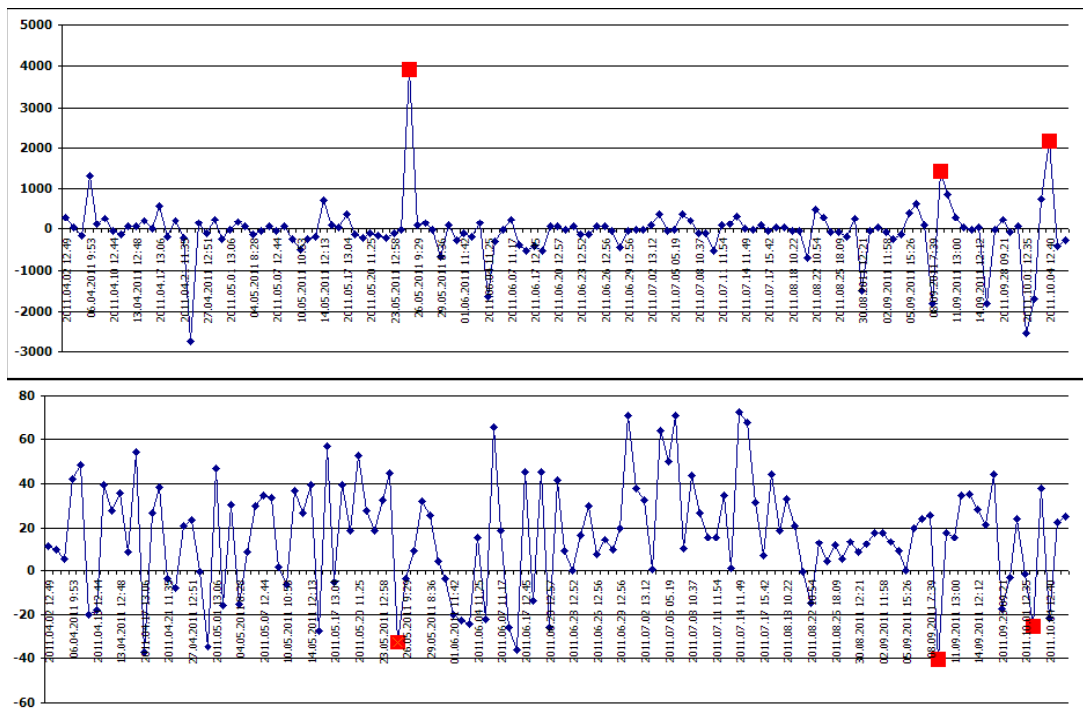


Рис. 5. Динамика показателей F и R зимовщика В. (Обозначения, как и на рис. 3).

В качестве таких очень низких значений выбирались значения R , меньшие -20 . При этом исходили из следующих соображений.

По результатам анализа гистограммы распределения значений R в апрельской и октябрьской сериях наблюдений отмечено, что в октябрьской серии наблюдений заметнее представлены наблюдения со значениями R , меньшими -20 (минус 20), соответствующие в рамках выдвинутой рабочей гипотезы шагам цикла номер 8, 9 траектории системы, представленной в табл. 2. Соответственно, в рамках детализированной таким образом рабочей гипотезы значение R меньше -20 рассматривается как диагностический признак, наличие которого свидетельствует о чувствительности ВНС к изменению метеорологических параметров. Для проверки этой детализированной рабочей гипотезы определялось значение коэффициента корреляции по Спирмену между изменением давления и значением индекса Баевского. В массиве наблюдений за период май – сентябрь 2011 года выделялись следующие две выборки:

- со значениями R меньшими минус двадцать (далее – первая выборка);
- со значениями R большими минус двадцать (далее – вторая выборка).

В первой выборке наблюдается высокое (0,481), статистически значимое ($p < 0.05$) значение коэффициента корреляции по Спирмену между изменением давления и индекса Баевского.

Во второй выборке наблюдается гораздо более низкое (0,026), статистически незначимое ($p > 0.05$) значение этого коэффициента. В результате упомянутая выше детализированная рабочая гипотеза получает подтверждение применительно к такому значимому метеорологическому параметру, как изменение атмосферного давления.

Таким образом, модельно-математический анализ взаимосвязей изменений барометрического давления и регуляции сердечного ритма человека позволяет выявить не только уровень чувствительности вегетативной регуляции деятельности сердца по отношению к перепадам атмосферного давления, но и определить критические временные периоды зимовки, когда уязвимость механизмов регуляции кровообращения проявляется в наибольшей степени. Кроме того, показанное повышение проявлений действия атмосферных факторов в середине и конце зимовки может характеризовать степень развития дезадаптационных процессов и использоваться в качестве дополнительного диагностического критерия для усовершенствования системы профилактики расстройств адаптации и развития сердечно-сосудистой патологии.

Выводы

1. Показана возможность использования моделирования системных факторов, определяющих устойчивость ВНС человека к изменению атмосферного давления в условиях Антарктики с применением ДМДС.
2. Получены результаты модельно-математического анализа данных мониторинга взаимосвязей изменений барометрического давления и регуляции сердечного ритма человека в Антарктике. Это позволяет оценить уровень чувствительности механизмов регуляции сердечного ритма к действию изменений барометрического давления в течение антарктической зимовки.
3. Математическое моделирование с применением ДМДС позволяет разрабатывать новые методические подходы к решению проблем контроля процессов адаптации и коррекции дизадаптационных расстройств человека, работающего в экстремальных климатических (антарктических) условиях.

Литература

1. **Малиновский А. А.** Значение общей теории систем в биологических науках // Системные исследования. 1986. – С. 83 — 115.
2. **Jansen V. A. A., Kokkoris G. D.** Complexity and stability revisited. *Ecology Letters* (2003), 6. — P. 498–502.
3. **Анализ** variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем: метод, рекомендации / Р. М. Баевский [и др.]. — М., 2002. — 53 с.
4. **Баевский Р. М.** Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний / Р. М. Баевский, А. П. Берсенева. — М. : Медицина. 1997. — 265 с.
5. **Вариабельность** сердечного ритма: Теоретические аспекты и практическое применение // Тез. докл. IV всерос. симп. / Отв. ред. Н. И. Шлык., Р. М. Баевский. — УдГУ. Ижевск. — 2008. — 344 с.

6. **Баевский Р. М.**, Иванов Г. Г. Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения // Ультразвуковая функциональная диагностика. — 2001. — № 3. — С. 108 — 127.
7. **Цветков В. А.** «Золотое сечение» и деятельность сердца. — 2005.
8. **Zholtkevich G. N.**, Nosov K. V., Bepalov Yu. G., Grigoryev A. Yu., Bondarenko I. V. Discrete Dynamic Model of Community of Species *Sus Scrofa* L Cubs in the Aviary // Science | BharatBhasha.com, added on November 24, 2009. <http://www.bharatbhasha.com/science.php/189944>.
9. **Григорьев А. Я.**, Попов В. В. Дискретное моделирование динамической системы зоопланктонного сообщества в связи с аспектами биобезопасности и биозащиты, связанными с эвтрофикацией водоемов. Veterinsry medicine. Inter-departmental subject scientific collection. — Issue 96. — 2012. — P. 273 — 275.
10. **Григорьев А. Я.**, Беспалов Ю. Г., Носов К. В., Каширин О. О., Москалев В. Б. Модель динамики растительных пигментов в водоеме при коррекции его экологического состояния с помощью ЭМ-технологий. Veterinary medicine. Inter-departmental subject scientific collection. — Issue 96. — 2012. — P. 271–273.
11. **Беспалов Ю. Г.**, Жолткевич Г. Н., Кислова О. Н., Носов К. В., Шпорт А. М. Внедрение интеллектуального анализа данных в социальные исследования: дискретная динамическая модель переселения украинских крестьян в Сибирь в конце XIX — начале XX столетия // Научное онлайн издание «СОЦИОПРОСТІР». — 2011. — № 2. — С. 7 — 13. http://www.sociology.kharkov.ua/socioprostir/files/magazine/2_2011/1_1.pdf.
12. **Lidicker W. Z., Jr.** (1979). “A Clarification of Interactions in Ecological Systems.” *BioScience*, 29(8), — P. 475 — 477.
13. **Беспалов Ю. Г.**, Дереча Л. Н., Жолткевич Г. Н., Носов К. В. Дискретная модель системы с отрицательными обратными связями // Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Серия «Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизация систем управления». — 2008. — № 833. — С. 27 — 38.
14. **Bepalov Yu.**, Gorodnyanskiy I., Zholtkevych G., Zaretskaya I., Nosov K., Bondarenko T., Kalinovskaya K., Carrero Y. Discrete Dynamical Modeling of System Characteristics of a Turtle’s Walk in Ordinary Situations and After Slight Stress // Бионика интеллекта. — 2011. — № 3 (77). — С. 54 — 59.