



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экологии и биоресурсов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему: **Анализ изменчивости соотношения Редфилда
в Финском заливе и возможные экологические следствия**

Исполнитель

Кузнецова Эльвира Эдуардовна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Ершова Александра Александровна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Дроздов Владимир Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«17» июня 2019 г.

Санкт-Петербург

2019



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экологии и биоресурсов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему: **Анализ изменчивости соотношения Редфилда
в Финском заливе и возможные экологические следствия**

Исполнитель

Кузнецова Эльвира Эдуардовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Ершова Александра Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Дроздов Владимир Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«17» июня 2019 г.

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Введение.....	3
1 Физико-географическое описание района.....	4
1.1 Физико-географическое описание Балтийского моря	4
1.2 Географическое положение Финского залива	6
1.3 Климатические факторы	8
1.4 Глубины и рельеф дна	10
1.5 Характеристика береговой линии	11
1.6 Гидрологические показатели.....	12
1.7 Гидрохимические показатели воды.	13
1.8 Флора и Фауна.....	14
2 Эвтрофикация как экологическая проблема Балтийского моря	18
2.1 Причины и последствия эвтрофикации.....	18
2.2 Проблема эвтрофирования в Балтийском море.....	23
3 Материалы и методы исследования.....	31
3.1 Исходные данные	31
3.2 Методы исследования	36
4 Анализ результатов исследования.....	40
Заключение	46
Список использованной литературы.....	49
Приложение А – Графики среднегодового N:P соотношения в Финском заливе.....	53
Приложение В – Графики N:P соотношения Редфилда по сезонам	62

Введение

Финский залив является малой и неглубокой частью Балтийского моря. Однако в зоне его водосбора проживает около 85 миллионов человек из трёх стран: Россия, Финляндия и Эстония. Каждое из государств осуществляет собственную хозяйственную и иную деятельность на своей территории. Водоем используется для различных целей: рыболовство, транспортные перевозки, хозяйственное использование, добыча полезных ископаемых и ресурсов. При неправильном планировании такая нагрузка может привести к плачевным последствиям за короткий срок. За счет активного использования ресурсного потенциала Балтийского моря вода не успевает самоочищаться. Это значит, что загрязняющие вещества могут сохраняться в толще воды на протяжении десятилетий. Одной из наиболее значимых и остро стоящих проблем на сегодняшний день является эвтрофикация Балтики.

Актуальность работы заключается в необходимости более точного определения вклада азота и фосфора в процессы эвтрофирования Финского залива с целью определения возможности управления потомками биогенных элементов.

Целью работы является анализ изменчивости коэффициента Редфилда в Финском заливе.

Объект исследования – Финский залив.

Предмет исследования – динамика N:P соотношения в Финском заливе.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Сбор теоретической информации об объекте исследования и его экологических проблемах.
2. Анализ исходных данных содержания азота и фосфора в западной и восточной частях Финского залива.
3. Построение и анализ N:P соотношения Редфилда.

1 Физико-географическое описание района

1.1 Физико-географическое описание Балтийского моря

Балтийское море – континентальный шельфовый бассейн Атлантического океана. Водоем омывает берега Дании, Германии, Польши, России, Литвы, Латвии, Эстонии, Финляндии и Швеции. Площадь водоема составляет 425400 км², объем воды – 20 100 км³. Балтийское море условно разделяют на северную часть (от широты Ирбенского пролива на север), центральную часть (от Ирбенского пролива до Клайпеды) и южную часть (до Датских проливов). Меридиан, который пересекает острова Форё и Готланд, делит Балтику на восточный и западный секторы. Географическое положение Балтийского моря представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Географическое положение Балтийского моря

По своему строению Балтийское море считается неглубоким шельфовым морем. Его средняя глубина – 48 м, максимальная зафиксированная глубина составляет 459 м (Ландсортский бассейн). На долю глубин более 50 м приходится 60% площади моря. Доля глубин более 200 м занимает 0,3% площади водного бассейна. Южная часть моря характеризуется равнинным дном, тогда как северный район в большей степени неровный и скалистый. Донные отложения представлены песками, глинистым илом (зеленый, черный, коричневый) ледникового происхождения. Балтийское море располагается в полосе умеренного гумидного климата. Южная и центральная части водоема не замерзают. Ботнический, Финский и Рижский заливы бывают скованы морским льдом с ноября.

Геоморфология бассейна Балтики очень разнообразна. Водоем имеет практически замкнутые заливы (Ботнический), изрезанную береговую линию, множество архипелагов островов. В районе Балтики глубинные зоны сменяются мелководными береговыми регионами.

Береговая линия Балтийского моря длинная и очень изрезанная. Этот факт обусловлен наличием множества заливов и островов. Особенно большое их количество наблюдается в северной части водоема. Общее количество островов насчитывается в несколько тысяч, однако большинство из них маленькие. Из крупных можно выделить следующие: Готланд, Эланд, Сааремаа, Рюген, Хийумаа, Борнхольм [5]. Общая длина береговой линии составляет около 8 000 км.

Балтийское море является одним из крупных солоноватых морей на Земле. Эта особенность обусловлена гидрологическим режимом водоема. В районе наблюдается избыток пресной воды за счет большого количества осадков и речного стока. Соленость воды в море уменьшается от запада к востоку. В районе Датских проливов у Северного моря значение солености на поверхности составляет около 20 ‰, в центральной части водоема – 6-8 ‰, в Финском заливе – 2 ‰. Как правило, в глубинных слоях моря соленость

несколько выше, чем в поверхностных. Градиент солености Балтики представлен на рисунке 2.

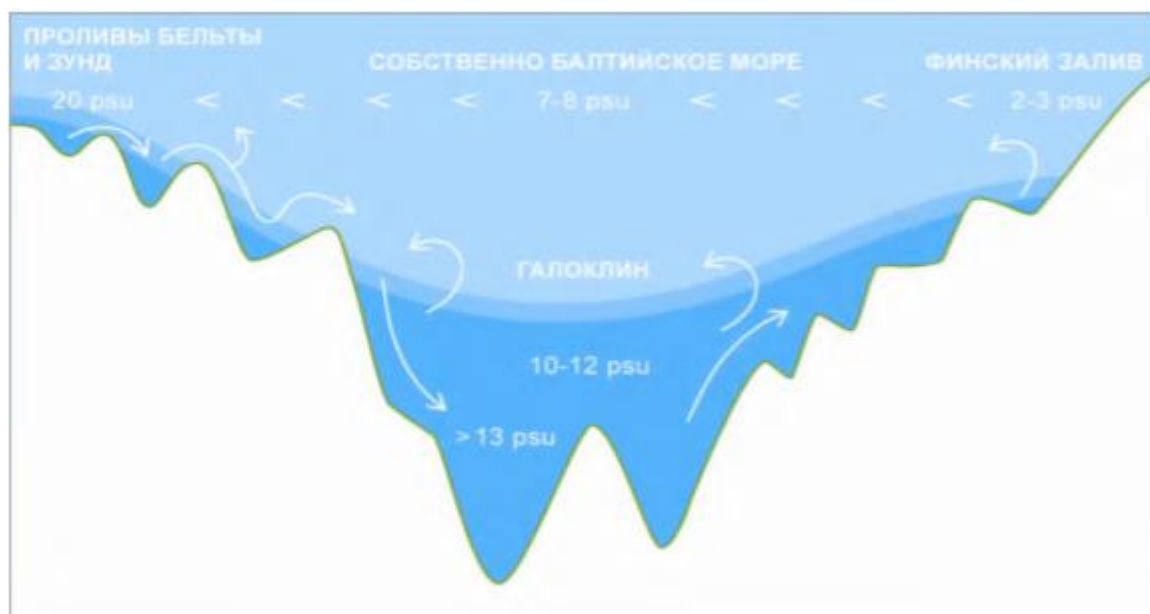


Рисунок 2 – Градиент солёности Балтийского моря [17]

Балтийское море является единственным внутренним морем, полностью находящимся в Европе и одним из крупнейших солоноватых водных бассейнов мира. Море разделяется на несколько субрегионов, которые значительно различаются по своим характеристикам. В то же время различия присутствуют и в более локальных местностях. В частности, Финский залив по своей структуре и характеристикам неоднороден. Значительные различия прослеживаются при рассмотрении суббассейна с востока на запад.

1.2 Географическое положение Финского залива

Финский залив является особой акваторией района Балтики. Он находится в восточной части рассматриваемого водоема (рисунок 3). Финский залив омывает берега трех государств – Россия, Финляндия и Эстония. Площадь Финского залива составляет 29500 км². Водосборный

бассейн включает в себя разветвленную речную сеть. Наиболее крупные реки, входящие в него – это Одер, Висла, Даугава, Нева, Неман [5].

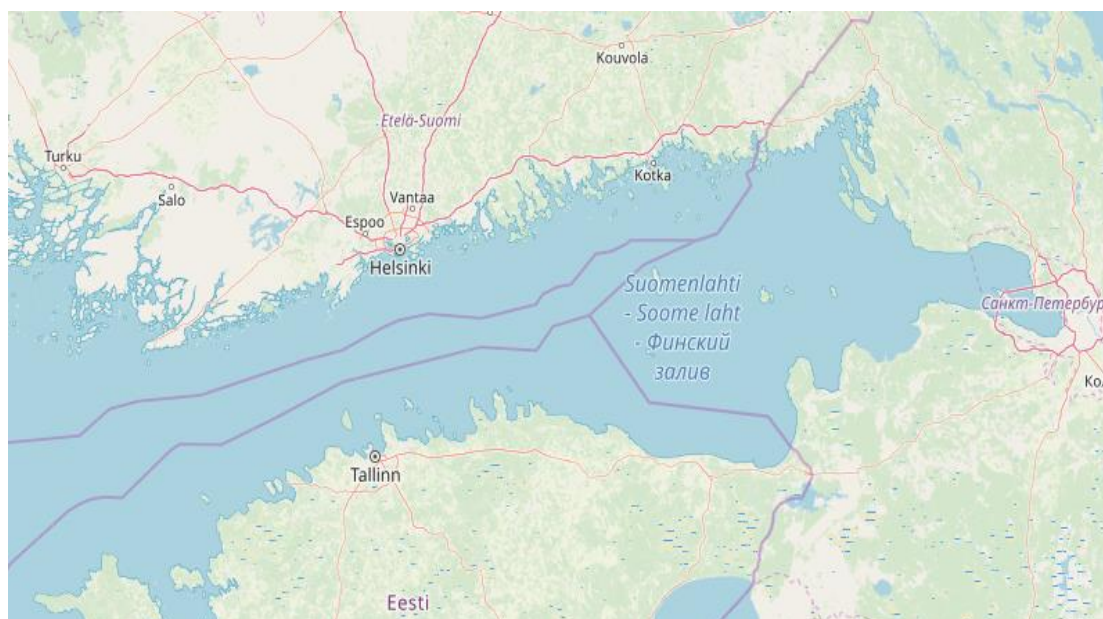


Рисунок 3 – Географическое положение Финского залива

Финский залив является относительно мелководным, меридионально вытянутым и узким. В масштабах Балтийского моря он имеет небольшие размеры. Западная граница залива – полуостров Ханко, восточная – город Санкт-Петербург (в месте впадения реки Невы в залив). Расстояние между ними составляет 420 километров [29]. Крупными городами на берегах Финского залива являются Кронштадт, Выборг, Таллинн, Хельсинки, Турку и Котка.

Несмотря на небольшие размеры залива, он в большой степени влияет на Балтийское море. Водосборная площадь Финского залива составляет четверть от всей водосборной площади моря [5].

Поскольку по гидрографическим и гидрологическим условиям, а также по гидрохимическому режиму западная и восточная части Финского залива сильно различаются, данные условно разделенные водные бассейны будут рассматриваться отдельно друг от друга.

Качество вод восточной части залива во многом определяется влиянием стока реки Невы и стоящим на ее берегах городом Санкт-Петербург. Данный бассейн представляет собой переходный район от пресноводного водоема к солоноватому. На режим его солености оказывает опресняющее влияние сток многочисленных рек, в большей степени Невы и Луги. В то же время Восточная часть Финского залива является мелководной, ей присущи все характеристики эстуария. В водах можно заметить некоторые пресноводные виды живых организмов. На гидрохимический режим большое влияние оказывает город Санкт-Петербург. С промышленными и бытовыми стоками в воды Невской губы и Финского залива попадает значительное количество биогенов и иных загрязняющих веществ. По результатам исследований [26] было выявлено, что в восточной части Финского залива более выражено весеннее «цветение» водорослей, соответственно, здесь в большей степени происходит накопление неорганических питательных веществ в зимний период.

Западная часть Финского залива является более глубоководной, здесь господствуют морские экосистемы, а на дне наблюдаются гипоксические условия. Перемешиванию вод зачастую препятствует устанавливающийся летом термоклин. На гидрологический и гидрохимический режимы данной акватории большое влияние оказывают заливы соленых вод из Центральной Балтики. Также замечена тенденция сдвига сроков весеннего цветения. В западной части оно происходит в апреле, а в восточной – в мае. Также отмечается тенденция уменьшения отношения минерального азота к минеральному фосфору с востока на запад [26].

1.3 Климатические факторы

Климат Финского залива является умеренным с избыточным увлажнением с преобладанием западных ветров. Среднее значение годовых осадков – 600 мм (70% из них приходится на теплое время года) при

испаряемости 250 мм. В любой сезон года наиболее влажными являются западные и северо-западные районы [5].

В данном районе наблюдается мягкая зима, преобладает пасмурная погода с частыми осадочными явлениями (снег, туман). Морозы бывают редко. В первой половине зимы при прохождении циклонов наблюдаются оттепели.

Весна холодная и долгая. В это время года частыми явлениями являются ночные заморозки и мокрый снег. Поздней весной осадки наблюдаются редко, погода становится устойчивой.

Лето прохладное, жаркие дни бывают редко. Во второй половине летнего сезона увеличивается количество осадков за счет ливневых дождей. В осенний сезон наблюдается теплая пасмурная погода с умеренным количеством осадков. Осенью наблюдаются туманы и порывистые ветры.

Климатической особенностью Финского залива является то, что на открытом побережье водоема климат, как правило, более мягкий. В районах глубоких заливов и фьордов климат суровый за счет увеличения суточных и годовых колебаний температуры воздуха и уменьшения относительной влажности [5].

Большое значение в формировании климата региона оказывают ветры, преобладающими из которых являются западные и южные. Благодаря направленным потокам воздуха в Финском заливе и во всей Балтике возникают длинные волны, нагоны, а также сгоны и сейши.

Преобладающие ветра в западной части Финского залива – это южные (зимой и осенью), юго-западные (весной), западные (летом). В восточной части Финского залива преобладают западные и юго-западные ветры во все сезоны года.

1.4 Глубины и рельеф дна

Финский залив является мелководным. Его средняя глубина составляет 38 метров, а максимальная глубина, зафиксированная у побережья Эстонии, составила 123 метра. Полное обновление всего объема вод в Финском заливе происходит за пять лет.

Финский залив располагается в месте сочленения Балтийского кристаллического щита и Русской плиты. Это крупная структурно-денудационная впадина, которая возникла во время кайнозойских тектонических движений. В четвертичном периоде район залива подвергался действию покровных ледников. Это послужило причиной преобразования поверхности корневых пород и формированию мощного гетерогенного чехла четвертичных образований [21].

Донный профиль Финского залива уменьшается от горла к вершине. Резкое его изменение отмечается в районе Нарва-Йыэсуу (Нарвская стенка). Рельеф дна сильно расчленен, дно усеяно подводными банками и скалами. Происхождение подобных форм рельефа связывают с дроблением древних пород южного края Балтийского щита. Дно южного берега более ровное, чем дно северных районов залива [5].

Преобладающие грунты Финского залива – илистые. У северных берегов также встречаются песчаные илы, камень и глинистый грунт. В глубинах южного берега илистый грунт, а на отмелях – песчаный. На западе Финского залива в прибрежной части встречается большое количество островов и фьордов (шхеров). Наиболее крупные острова: Березовые острова, архипелаг Большой Фискар, Рондо, Котлин, Мощный и Гогланд. Последний условно делит Финский залив на западную и восточную части.

1.5 Характеристика береговой линии

Финский залив является относительно обособленным регионом, это крупная денудационная впадина, которая возникла в результате кайнозойских тектонических движений. Северный берег невысокий, пересеченный, он покрыт хвойным лесом на скалах и валунах. Берег представлен твердыми кристаллическими породами (гранит, гнейс). Рельеф изобилует моренными грядами, холмами, а также множеством водоемов.

На всем протяжении северный берег покрыт шхерами. Острова на их опушках не имеют растительности, а в глубине шхеров присутствует лес [5]. Заливы северного берега неглубокие, наиболее глубокий из них, Выборгский залив.

Южные берега Финского залива состоят из осадочных пород (известняк). Характерная особенность данной местности – чередование обрывистых и низинных участков. Южный берег имеет хвойную растительность, которая на отдельных участках чередуется с пашнями и кустарниками.

Южный берег является менее изрезанным, чем северный. В то же время здесь также находится большое количество заливов и бухт. Самые крупные их них: Нарвский залив, Лужская губа, Копорская губа.

Нева является наиболее крупной рекой, которая впадает в Финский залив. В месте впадения она образует дельту. Воды реки значительно влияют на солевой баланс залива, опресняя его восточную часть. На берегу Невы и на островах дельты расположен мегаполис – город Санкт-Петербург [6].

1.6 Гидрологические показатели

В восточной части Финского залива средняя зимняя температура составляет 0°C , в западной части – $0-2^{\circ}\text{C}$. Средние летние температуры восточной части водоема выше ($18-20^{\circ}\text{C}$), чем в западной ($16-18^{\circ}\text{C}$). Среднегодовая температура водных масс схожа с температурой воздуха. Температура дна водоема является постоянной, она составляет около $2-3^{\circ}\text{C}$ [4].

В вертикальной структуре залива в летний период в условиях прогрева поверхностных вод четко прослеживается термоклин, С наступлением осени он постепенно сглаживается за счет ветрового и конвективного перемешивания водных масс. В зимнее время вертикальное распределение вод однородное.

Финский залив обладает особенностями, которые характерны для крупных эстуариев. Его отличительной чертой является то, что это переходная зона между почти пресными водами Невской губы и солеными водами у островов Гогланд. С восточной части со стоком реки Невы поступает большое количество пресных вод. В то же время с западной и центральной части Балтийского моря поступают соленые воды. Таким образом, соленость вод значительно отличается в разных частях Финского залива. На поверхности воды в устье Невы до острова Кронштадт она составляет 0 ‰ и в западной части у острова Гогланд – $6-6,5$ ‰. Как правило, соленость воды у поверхности значительно ниже данного параметра в придонных слоях. В глубоководной части Финского залива значения солености колеблется в пределах $2,41-3,02$ ‰ [11].

Кроме этой особенности наблюдается интенсивное вертикальное перемешивание водных масс, которое снижается с глубиной за счет галоклина. В придонных слоях залива соленость несколько выше, чем на поверхности. Среднее значение данного показателя по всему Финскому

заливу составляет от 5 до 8 ‰. В восточной части соленость колеблется в пределах 0-5 ‰.

Ледовый режим Финского залива определяется климатическими факторами рассматриваемой местности, а также особенными солевыми условиями. В зимний период залив покрыт ледовым покровом в течение пяти месяцев. Наибольшее распространение льда наблюдается в феврале. Замерзание воды происходит с востока на запад, таяние осуществляется в обратном направлении. Ежегодное замерзание залива происходит в восточной его части, западная часть покрывается льдом только в особо суровые сезоны. Обычно лед формируется 1 декабря в Невской губе, в глубоководных частях позже. Последние отдельно плавающие льдины в Выборгском заливе тают 1 мая [5].

1.7 Гидрохимические показатели воды.

Из органолептических показателей следует рассмотреть прозрачность и цвет воды. В восточной части Финского залива прозрачность вод варьируется от 0,9 м в Лужской губе до 2,9 м в Копорской губе. Цвет воды зеленовато-желтый. Параметр прозрачности увеличивается с востока на запад, и у островов Гогланд составляет 4,1 м. Такая разница связана с промышленной деятельностью города Санкт-Петербург, а именно гидротехнические работы у Васильевского острова и строительство зданий и портов по берегам Финского залива. Цвет воды в центральной части Финского залива постепенно изменяется на желтовато-зеленый.

Водородный показатель в водах Финского залива относительно постоянный при рассмотрении динамики изменения рН в многолетнем ряду данных. Водородный показатель в среднем составляет от 7,15 в летний период до 8,01 в зимний период. Значение параметра не выходит за пределы нормативно установленных границ.

Значения щелочности колеблются в пределах 0,482-1,431 мг-экв/дм³. Насыщенность кислородом находится в пределах нормы, наиболее высокие значения отмечаются в летний период. Такая тенденция обусловлена увеличением численности фитопланктона в период с мая по июль. Средняя концентрация O₂ в воде составляет 11,0 мг/дм³, среднее насыщение – 95%.

Средняя концентрация минерального фосфора составляет от 22,0 мкг/дм³ на поверхности 43 мкг/дм³ у дна. Максимальные значения данного показателя наблюдаются в придонных слоях. Режим фосфора в восточной части Финского залива играет важнейшую роль, поскольку именно данный элемент в большинстве случаев лимитирует первичную продукцию в этом регионе. В западной части Финского залива в основном (в летний период) лимитирующим элементом выступает азот [24].

Концентрация аммонийного азота в Финском заливе составляет 57 мкг/дм³ (среднемноголетнее значение). Наибольшие значения фиксируются летом и ранней осенью. Средняя концентрация нитритов составляет 5,0 мкг/дм³. Концентрация нитратного азота различна и изменяется в пределах 85-860 мкг/дм³ [11].

Характерной особенностью Балтийского моря в целом является сильная фиксация азота цианобактериями, обильная денитрификация в бескислородных донных водах и изменчивыми условиями питания в разных бассейнах [31].

1.8 Флора и Фауна

Разнообразие живых организмов в Финском заливе определяется в первую очередь влажным континентальным климатом. Солоноватые воды залива и холодные зимы формируют сложные условия для жизни живых организмов. Многие виды здесь обитают на пределе своей адаптации. По берегам водоема повсеместно распространены хвойные и лиственные леса, а также прибрежные луга и скалы. Основные древесные виды: сосна, ель,

береза, ольха, осина, рябина. Восточной части залива характерны болота, растительность которых представлена камышом, тростником, желтой и белой кувшинкой и осокой острой. Также распространенными водными растениями являются штукения зостеровидная, руппия коротконожковая, наяда морская [5].

Водная фауна Финского залива представлена различными видами промысловых и иных видов рыб. Прибрежная зона изобилует пресноводными видами, тогда как в открытой части доминирует балтийская сельдь. Здесь водятся: атлантический лосось, верховка обыкновенная, форель, линь, лещ, плотва, пескарь, налим, обыкновенный окунь, карась, колюшка, минога, сиг, судак, щука, килька, балтийская сельдь, атлантическая треска и корюшка. Изредка можно встретить серого тюленя (*Halichoerus grypus*) и кольчатую нерпу (*Phoca hispida*) [6].

Из макрофитов и макроводорослей можно выделить зеленые нитевидные водоросли, сообщества рдеста в закрытых бухтах, фикус пузырчатый (*Fucus vesiculosus*), а также камышовые водоросли. Макробентос в данном регионе представлен некоторыми видами полихет, разноногими (*Pontoporeia affinis*) и равноногими раками (*Saduria entomon*), двустворчатыми моллюсками (*Macoma balthica*). Финский залив является районом стоянки некоторых перелетных птиц и имеет большое значение для размножения гаги и крачек [17].

Биоценоз балтийского региона и, в частности, Финского залива является очень чувствительным к происходящим изменениям в окружающей природной среде. Международная морская организация (International Maritime Organisation, IMO) в 2004 году объявила данный район особо уязвимой морской зоной [17].

Зональное распределение фитопланктона в районе исследования обусловлено неоднородностью солености и температурного режима водоема. Вертикальное распределение фитопланктона зависит от интенсивности света. Верхний слой воды (0-15м) имеет более богатый состав водорослей. Важной

особенностью является то, что в прибрежных районах, заливах и эстуариях имеется дополнительный источник поступления биогенов, поэтому фитопланктон верхнего слоя здесь богаче.

Летнее «цветение» фитопланктона наблюдается на верхнем слое (10-15м), весеннее цветение может наблюдаться до больших глубин. Количество фитопланктона уменьшается с глубиной.

В Балтийском море ярко выражен сезонный характер развития фитопланктона. Выделяется четыре сезона года (зима, весна, лето и осень), а также семь стадий годовой сукцессии фитопланктона:

- а) зимняя стадия,
- б) весенний пик (май),
- в) начало лета,
- г) летний минимум,
- д) летний максимум (август),
- е) осенняя стадия,
- ж) поздняя осень.

Биомасса продуцентов имеет три пика роста: весенний, летний и осенний. Зимой наблюдается низкий уровень биомассы и пониженная первичная продуктивность. Весенний период характеризуется увеличением поступления солнечного излучения и установлением термоклина, что препятствует перемешиванию водных масс. Устанавливаются оптимальные условия для развития диатомовых водорослей. Весенний пик в Финском заливе наблюдается в конце апреля – начале мая.

С наступлением лета поверхностные слои воды обедняются питательными веществами, устанавливается галоклин. В это время начинают развиваться динофлагелляты и сине-зеленые водоросли. Летний минимум наступает в момент минимального содержания питательных элементов в воде при большом количестве солнечного света. В это время ярко выражен сезонный термоклин [3].

В точке летнего максимума достигает своего пика массовое развитие сине-зеленых водорослей (*Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon* sp.). Эти виды могут ассимилировать атмосферный азот. Причиной массового размножения данных видов считают пониженное соотношение Редфилда – минеральных форм азота к фосфору. Основные скопления фитопланктона обнаруживаются в верхнем слое воды (0-30 м) [6].

Осенний пик «цветения» фитопланктона наблюдается только в южной части Балтики. Он объясняется выравниванием температуры водных масс по вертикали и их перемешиванию. В результате происходит вынос биогенов из глубинного слоя в фотический. В это время наблюдается второй пик развития диатомовых водорослей. Поздней осенью продуктивность снижается до зимнего минимума из-за уменьшения количества солнечной радиации и понижением температуры [3].

2 Эвтрофикация как экологическая проблема Балтийского моря

2.1 Причины и последствия эвтрофикации

Эвтрофикация (др. греч. – «хорошее питание») – процесс повышения биопродуктивности и ухудшения качества вод, вызванный избыточным поступлением биогенных элементов, прежде всего азота и фосфора, под воздействием антропогенных и естественных факторов [27].

Азот и фосфор – основные питательные элементы, которые входят в структуру всего живого вещества. В воде азот может быть представлен в следующих растворенных формах: аммоний (NH_4^+), нитрат (NO_3^-) и нитрит (NO_2^-). Органический азот входит в состав мочевины, аминокислот и пептидов. Характерные сезонные изменения концентраций минерального азота можно наблюдать весной. В это время года его становится меньше, а летом за счет увеличения температуры и ускорения процессов разложения органики происходит увеличение его концентрации.

В природных водах бактерии участвуют в биогеохимическом цикле азота. Органические формы азота минерализуются и преобразуются в аммиак. После этого аммиак окисляется до нитрата. Этот процесс называется нитрификация. Нитрат может денитрифицироваться в газообразный азот. Обратный процесс, заключающийся в фиксации азота, происходит в воде за счет сине-зеленых водорослей.

Фосфор может находиться в природных водах в виде фосфатов (PO_4^{3-}), растворенного органического фосфора и твердых его частиц. Соединения фосфора поступают в воду в процессе выветривания пород, содержащих апатиты и фосфориты, поступления со сточными водами (удобрения, моющие средства и т.д.), образуются в результате разложения органики. Поступающий в водные объекты фосфор концентрируется в донных отложениях. Он может высвобождаться при контакте с кислородом.

Основные источники поступления азота и фосфора представлены в таблице 1.

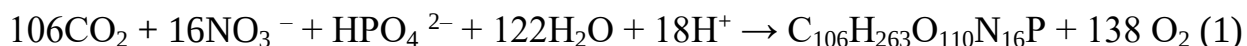
Таблица 1 – Источники поступления азота и фосфора в водоемы

Источники поступления	Азот (нитритный, нитратный, аммонийный)	Фосфор (фосфатный)
Естественные	- ассимиляция сине-зелеными водорослями, - разложение белковых веществ и мочевины, при анаэробном восстановлении нитратов и нитритов.	- эрозия почв, выветривание пород, (апатиты и фосфориты), - поступление из донных отложений, - продукты разложения.
Искусственные	- животноводческие фермы; - хозяйственно-бытовые сточные воды; - поверхностный сток с с/х угодий (аммонийные удобрения); - сточные воды предприятий пищевой, коксохимической, лесохимической и химической промышленности.	- сельскохозяйственные стоки (фосфатные удобрения); - промышленные сбросы; - коммунальные стоки (главным образом моющие средства).

Основа эвтрофирования – это процесс фотосинтеза. Это комплекс реакций, производимых продуцентами в присутствии световой энергии Солнца. Фотосинтез берет свое начало в зеленых клетках растений и заканчивается синтезом органики из воды и углекислого газа. Однако для синтеза органических веществ требуются макроэлементы, такие как кальций, магний, калий, сера, азот и фосфор, и микроэлементы (например, бор, марганец и селен) [18]. Однако именно нитраты и фосфаты являются

лимитирующими веществами при фотосинтезе продуцентов. Нехватка одного из них будет ограничивать рост и развитие растений.

В естественных водных экосистемах процесс фотосинтеза можно представить в следующем виде [1]:



где $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$ - усредненный состав органического вещества фитопланктона.

В водных организмах роль азота и фосфора крайне высока. Первый из них играет важнейшую роль при построении белков клеток, второй участвует в клеточном переносе энергии в клетках организмов. Потребность в данных элементах выражается в различных соотношениях, которые различны для растительных организмов разных видов.

Органическое вещество фитопланктонов в среднем содержит постоянное соотношение атомов азота и фосфора. В мольных концентрациях оно выглядит следующим образом: 16N:1P. Это соотношение называется показателем Редфилда. Оно считается оптимальным отношением концентрации растворенного неорганического азота к растворенному неорганическому фосфору для роста и развития фитопланктона в воде. Очевидно, что меньшее значение соотношения будет свидетельствовать о нехватке азота, а большая величина коэффициента Редфилда будет говорить о нехватке фосфора для первичной продукции водных продуцентов.

Лимитированию могут подвергаться три основных характеристики:

- а) скорость роста отдельных видов морских водорослей (фитопланктон);
- б) первичная продукция, накопление биологической массы в водоеме;
- в) продукция экосистемы [22].

Соотношение поглощения минеральных форм азота к фосфору различается у разных видов и стадий жизни организмов, что влияет на биогеохимию во многих морских экосистемах. Таким образом, отклонения в

ту или иную сторону классического N:P соотношения влияют на развитие биомассы и динамику пищевых цепей водоема [3].

Процесс эвтрофирования в той или иной мере происходят во всех водоемах. Он представляет собой естественное преобразование водного объекта из олиготрофного в эвтрофный, и в итоге – в гипертрофный водоем. Однако такие процессы в природных экосистемах идут очень медленно из-за поступления питательных веществ в результате эрозийных почвенных процессов, с осадками и из биологических источников. Суммарное поступление веществ в таком случае невелико [6]. В настоящее время процессы эвтрофикации идут гораздо интенсивнее за счет антропогенного вмешательства [16].

Начальные этапы эвтрофикации водоема обычно не являются вредными. Наоборот, данный процесс повышает биологическую продуктивность, что положительно сказывается на биоразнообразии объекта. При дальнейшем развитии эвтрофирования начинают преобладать отрицательные эффекты. Они связаны с тем, что высокие показатели концентраций азота и фосфора создают условия для чрезмерного развития цианобактерий (в основном это сине-зеленые водоросли, некоторые из которых являются токсичными: *Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon* sp.). Разложение организмов требует большого количества кислорода, которого впоследствии не хватает для остальных гидробионтов. Таким образом, процесс эвтрофикации в конечном счете может привести к неустойчивости морских экосистем [27].

Присутствие излишков биогенных элементов повышает уровень первичной продукции, как следствие возникает массовое развитие микроскопических водорослей и наблюдается «цветение воды». При активных процессах эвтрофикации происходит зарастание прибрежной зоны, увеличение количества эпифитов и макроскопических водорослей. Таким образом, ухудшается состояние среды обитания множества ценных рыб.

Переизбыток питательных элементов вызывает характерные ответные реакции воды. В таких условиях повышается активность и скорость размножения водорослей, истощаются запасы кислорода в воде, повышается мутность. За счет увеличения потребления растворенного кислорода его концентрация постепенно уменьшается. Дефицит кислорода и образование сульфида водорода (H_2S) приводят к заморам гидробионтов [17].

Процесс эвтрофикации выражается в таком состоянии водной экосистемы, в котором высокие концентрации питательных веществ стимулируют рост морских водорослей. Это приводит к дисбалансу в функционировании системы, который выражается в следующих факторах:

- а) интенсивный рост водорослей, избыток нитчатых водорослей, «цветение» фитопланктона (увеличение биомассы и первичной продукции);
- б) образование избытка органического вещества в воде;
- в) уменьшение концентрации растворенного в воде кислорода (из-за увеличения его потребления);
- г) изменение структуры видового состава экосистемы, гибель зообентоса;
- д) уменьшение прозрачности воды из-за повышающейся концентрации сестона;
- е) чрезмерное распространение макрофлоры дна и микрофлоры прибрежных зон;
- ж) увеличение количества отложений на дне водоема, появление сероводорода.

В результате процесса эвтрофирования наблюдается накопление большого количества органики. На ее окисление интенсивно расходуется кислород, что приводит к дефициту кислорода в воде. Изменяется газовый и световой режимы водоема, что неизбежно ведет к структурным изменениям состава сообществ. В результате значительно ухудшается состояние среды обитания множества ценных видов рыб. В условиях дефицита кислорода и интенсивном образовании сульфида водорода возникают заморы [23].

2.2 Проблема эвтрофирования в Балтийском море

Сочетание высокой плотности населения, развитого сельскохозяйственного сектора и других видов хозяйственной деятельности (энергетика, транспорт) привело к увеличению объемов поступления питательных веществ в Балтийское море. Уязвимость данного региона обусловлена стратификацией водных масс, которая устанавливается из-за различий в солености, температуре и сезонными изменениями. С точки зрения эвтрофирования стратификация препятствует вентиляции и поступлению кислорода в глубинные слои. Гипоксильные условия оказывают влияние на трансформацию питательных веществ, в частности на процессы нитрификации и денитрификации, а также на способность отложений связывать фосфор [28].

ХЕЛКОМ в 2009 году присвоил статус эвтрофикации 189 регионам Балтики, 17 из которых открытые районы и 172 – прибрежные. Финский залив относится к району с «плохим» статусом эвтрофикации (рисунок 4). Это значит, что процессы эвтрофирования здесь наиболее выражены.

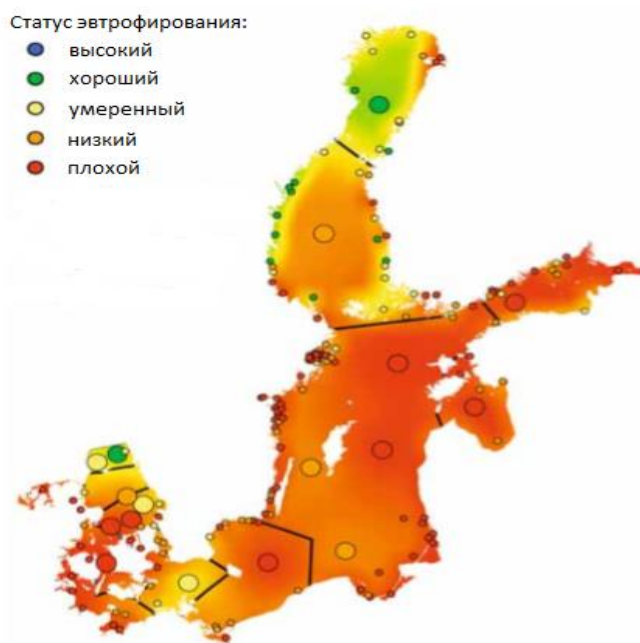


Рисунок 4 – Статусы эвтрофикации в Балтийском море (HELCOM, 2013) [26]

Первичная продукция фитопланктона ограничивается лимитирующим фактором, который находится в минимуме. Это может быть свет, углерод или питательные элементы (азот и фосфор). В некоторых случаях ограничивать рост продуцентов могут такие соединения как SiO_2 , Fe и т.д. Однако считается, что в Балтийском море наиболее ограничивающими веществами являются именно азот и фосфор. Причем важность обоих элементов меняется между бассейнами и в различные сезоны года.

Первичная продукция Балтийского моря в большей степени лимитируется азотом за исключением Ботнического залива и восточной части Финского залива. Также ограничение азотом наблюдается после весеннего пика биомассы первичной продукции (летний минимум). В это время вспышки численности азотфиксирующих цианобактерий связаны с избытком фосфора и высокими температурами воды. Данные микроорганизмы в свою очередь выступают дополнительным источником азота в водах [28].

Основные источники поступления азота и фосфора в Балтийское море:

- а) естественные фоновые (эрозия почв);
- б) наземные точечные (коммунальные и промышленные сточные воды);
- в) наземные рассредоточенные или диффузные (сток с сельскохозяйственных угодий, лесных площадей).

Финский залив является одним из самых эвтрофированных заливов Балтийского моря. Основная причина эвтрофирования – это большие нехарактерные нагрузки азота и фосфора из наземных источников [6].

Основной точечный источник поступления биогенов в залив – северо-запада города Санкт-Петербург. От эффективности очистки сточных вод города во многом зависит состояние акватории Невской губы и Финского залива [9]. Вторые отличаются тем, что поступление биогенных элементов в большей степени определяется характеристиками подстилающей поверхности, а также гидрометеорологическими факторами (осаждением их атмосферы и высвобождением донных отложений).

Общий объем поступления азота и фосфора в Финский залив определяется долей от каждой страны. Она в свою очередь зависит от размера водосборного бассейна, численности населения, развития сельского хозяйства, качества очистки сточных вод и ряда дополнительных причин [22]. Только со стоком реки Нева привносится 8% всех биогенных веществ: 3 тысячи тонн фосфора и 60 тысяч тонн азота. Несмотря на улучшение технологий очистки сточных вод за последние 20 лет уровень продукции фитопланктона увеличился в 2-3 раза. Так, можно говорить о том, что восточная часть Финского залива является эвтрофным водоемом [2].

Такое чрезмерное нехарактерное привнесение азота и фосфора в естественные экосистемы антропогенными источниками в некоторой степени может изменять оптимальные соотношения растворенных минеральных форм рассматриваемых элементов [4]. В 2011 году ХЕЛКОМ провел комплексную тематическую оценку обогащения питательными веществами в балтийском море. В результате исследований статус эвтрофикации был присвоен 189 районам Балтики. Основная часть из них (172 района) были прибрежными, и небольшая часть (17) открытыми местностями [26].

Морские экосистемы Балтийского моря, и, в частности, Финского залива, являются чувствительными к процессам эвтрофирования. Это обусловлено небольшим объемом водоема, мелководностью, дроблением на отдельные водоемы со своими особенностями [28]. Восточная часть Финского залива подвергается большой техногенной нагрузке, которая определяется нахождением на его берегах крупного промышленного комплекса – города Санкт-Петербург. Он является источником поступления большого спектра биогенных и минеральных соединений, многие из которых токсичны и нехарактерны для экосистемы эстуария. Например, в рыбе могут встречаться повышенные концентрации диоксинов и ПХБ [19].

Обогащение питательными веществами и смягчение последствий эвтрофикации в течение десятилетий и в настоящее время остаются основными проблемами Балтийского региона. Для решения множества

экологических вопросов страны, находящиеся по берегам Финского залива, объединились для совместного сотрудничества.

В 1955 году Финляндия и СССР впервые начали сотрудничать в сфере науки и техники. Спустя почти два десятка лет в 1974 году была принята Хельсинкская Конвенция. Руководящий орган данной конвенции – ХЕЛКОМ. После распада СССР в 1992 году новый документ был принят и подписан всеми странами, которые находятся на водосборной площади Балтийского моря, и Европейским сообществом. Этот год считается началом международного сотрудничества трех стран на берегах Финского залива. Новая конвенция учитывала положения вновь принятых экологических и морских законодательных актов.

Международная конвенция вступила в силу 17 января 2000 года. Ее положения касаются всего района расположения Балтики, внутренних вод, морских экосистем и дна водоема. Нормативный акт утверждает меры для водосборного бассейна моря для уменьшения привнесения загрязняющих веществ от наземных источников [8].

В связи с ухудшением природной среды водоема в 1996 году был организован первый год Финского залива на уровне министерств. В город Псков прибыли делегации из Эстонии и Финляндии. В результате была подписана декларация, целью которой являлось получение точных сведений о настоящем состоянии Финского залива и антропогенной нагрузке на него [19]. Также с 2000 года проводится День Балтийского моря, в городе Санкт-Петербург каждый год проводятся обсуждения с представителями ХЕЛКОМ.

План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю (BSAP) представляет собой стратегию, предусматривающую цели и задачи для восстановления устойчивого экологического состояния морской среды к 2021 году [26]. В 2007 году были установлены максимальные значения вклада питательных веществ в Финский залив. Таким образом, поступление фосфора ограничивается 4860 тоннами в год, азота – 106 680 тонн/год [16]. Наиболее эффективным в плане экономической выгоды и быстроты решения проблемы

эвтрофирования является усовершенствование очистных сооружений сточных вод в целях увеличения процента задерживаемого фосфора. ХЕЛКОМ установила рекомендуемое среднее годовое содержание фосфора в очищенных водах в количестве 0,5 мг/л [17].

План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю имеет отдельный сегмент, посвященный эвтрофикации. Он посвящен уменьшению уровня данного процесса и включает пять экологических целей. Они представляют собой характеристики Балтийского моря для достижения так называемого «хорошего экологического статуса» (“Good Environmental Status”):

- а) концентрация питательных веществ, приближенная к естественным значениям,
- б) чистая вода,
- в) естественный уровень цветения водорослей,
- г) естественные уровни распределения водных организмов,
- д) естественный уровень растворенного в воде кислорода.

Данные экологические цели имеют особые индикаторы, которые помогают оценить степень достижения результатов. Индикаторы включают в себя соответственно для каждой цели:

- а) зимние концентрации питательных веществ в поверхностной слое воды;
- б) летняя прозрачность воды по диску Секки;
- в) концентрация хлорофилла «а»;
- г) диапазон глубин распространения растительности;
- д) площадь и продолжительность сезонного истощения кислорода [26].

Изучение состояния Балтийского моря проводится с 20 века. Долгосрочные тенденции динамики процессов эвтрофикации можно разделить на три последовательные стадии: период отсутствия эвтрофирования (до 1940-ых гг.), начало процессов эвтрофикации (1940-1980 гг.), период застоя (с 1980-ых гг. по настоящее время). Это связано с антропогенными нагрузками на Балтийское море в различное время. BSAP

намеревается начать следующий четвертый период – период олиготрофирования Балтики, то есть уменьшения вклада органических веществ в водоем [26].

Для проведения масштабного исследования и оценки современного состояния Финского залива в 2014 году был проведен тематический год «Финский залив – 2014». Целью мероприятия было принятие мер по защите и восстановлению природной среды залива через международное сотрудничество трех стран [19].

В 2012 году был подписан меморандум о реализации программы «Финский залив – 2014». Сторонами документа являлись Министерство окружающей среды Финляндской республики, Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Министерство окружающей среды Эстонской республики. В каждой из трех стран работали свои комитеты по подготовке мероприятий, ответственным за их координацию был Секретариат Института окружающей среды Финляндии.

Сфера деятельности в рамках года Финского залива включала в себя научные встречи, форумы, проведение исследований, мониторинг состояния водного объекта. Последнее заключалось в создании базы данных по оценке состояния Финского залива за 1996-2014 гг. Ключевыми темами мероприятия являлись проблема эвтрофикации и изменения климата.

В период 1980-1990 гг. нагрузки фосфора из внешних источников уменьшились более чем на 30%. Это произошло за счет проведения многочисленных водоохранных мероприятий, а также из-за спада экономики и сельского хозяйства в России и Эстонии во время распада СССР.

Долгое время сточные воды Санкт-Петербурга выступали в роли значительного вкладчика биогенов в Финский залив. Город является крупнейшим точечным источником загрязнения Невской губы и Финского залива. В настоящее время в ведении ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» находится 14 очистных сооружений. Они осуществляют очистку больших

объемов сточных вод города от загрязнителей. Основные станции аэрации города Санкт-Петербург:

- а) Центральная станция (ЦСА) имеет производительность 1 500 000 м³/сут. (на 2011 год). Располагается на острове Белом, сброс воды производит в устье Большой Невы;
- б) Северная станция аэрации (ССА) располагается в районе поселка Ольгино (производительность – 600 000 м³/сут.);
- в) Красносельская СА осуществляет сбросы в юго-восточный прибрежный район Невской губы 70 000 м³/сут.;
- г) Петродворцовая СА осуществляет сбросы в южный прибрежный район Невской губы 50 000 м³/сут [24].

За последние 10 лет приняты шаги в совершенствовании технологий очистки, особое внимание уделяется очистке вод от осадка. По данным 2014 года очистке подвергается 98,5 % всех сточных вод города. На рисунке 5 представлен график снижения нагрузки азота и фосфора в сточных водах [7].



Рисунок 5 – Масса сброса загрязняющих веществ со сточными водами г. Санкт-Петербург в Финский залив в период с 1978 по 2018 гг. [7]

28 июня 2011 года началось выполнение рекомендаций ХЕЛКОМ по выбросу органических веществ. В это время были внедрены новые

технологии глубокого удаления биогенных элементов из воды. Очистка главным образом была направлена на удаление азота и фосфора. Через два года 10 октября 2013 года было завершено строительство Главного канализационного коллектора северной части города. Таким образом, все предпринятые мероприятия привели к улучшению состояния Финского залива. Содержание фосфора и азота в сточных водах в настоящее время не превышает требования Хельсинской комиссии (0,5 мг/л и 10 мг/л соответственно) [10]. Таким образом, постепенно осуществляется работа по снижению нагрузки на Финский залив и Балтийское море в целом.

3 Материалы и методы исследования

3.1 Исходные данные

В работе в качестве исходных данных были использованы результаты международного мониторинга водной среды Финского залива в период с 1996 по 2013 гг. В результате трехстороннего сотрудничества России, Финляндии и Эстонии в 2014 году в рамках тематического года была создана база данных, содержащая гидрохимические, гидрологические и гидробиологические показатели состояния водной среды Финского залива за указанный промежуток времени. Особенностью исследований являлась общая система наблюдений, единые методы измерения, использование общих информационных БД.

Общая база данных сформирована на основе продолжительных наблюдений за состоянием Финского залива. Она находится в открытом доступе для исследователей. Исходные данные были получены по запросу для исследовательской работы из Финского института окружающей среды. Полученные данные представлены в виде электронных таблиц (.xls).

Сбор данных осуществляли финские научные институты: Институт окружающей среды Финляндии (Finnish Environment Institute, SYKE), Юго-Восточный центр экономического развития (South-East Finland Centre for Economic Development). Со стороны Эстонии участвовали следующие институты: Эстонский морской институт (Estonian Marine Institute, EMI), Институт морских экосистем (Marine Systems Institute), Таллинский технологический университет (Tallinn University of Technology, MSI). Со стороны России мониторинг проводили Росгидромет, ФГУП «Севморгео», Российский государственный гидрометеорологический университет и Экологический институт РАН [25].

В год Финского залива была предпринята попытка унификации системы мониторинга. В этом заключается ключевая особенность

мероприятия. Стоит отметить, что методы отбора и обработки проб различаются в различных странах. Проведение мониторинга в России осуществляется в соответствии с Руководящими документами.

Для определения азота нитритного применяются методы Грисса-Илосвая и Бендшнайдера-Робинсона (РД 52.10.740-2010 [13]). Отбор проб производят согласно ГОСТ 17.1.5.05, ГОСТ 17.1.3.08 и ГОСТ Р 51592. Необходимо соответствие оборудования для отбора проб ГОСТ 17.1.5.04 и ГОСТ Р 51592.

В основу методики определения азота нитратного положен модифицированный Сапожниковым метод Вуда, Армстронга и Ричардса. Фотометрический метод определения массовой концентрации азота нитратного основан на восстановлении нитратов омедненным металлическим кадмием до нитритов и последующем определении образующихся нитритов по реакции с реактивом Грисса. Максимум оптической плотности в спектре азокрасителя наблюдается при 543 нм. (РД 52.10.745-2010 [12]).

Сумму неорганических соединений фосфора называют "фосфор минеральный" или "фосфаты". В основу методики положен модифицированный метод Морфи и Райли с использованием аскорбиновой кислоты в качестве восстановителя. Из форм неорганического фосфора предложенным методом можно определить только то количество фосфора, которое входит в состав солей ортофосфорной кислоты. Отбор проб производят согласно ГОСТ 17.1.5.05, ГОСТ 17.1.3.08 и ГОСТ Р 51592. Необходимо соответствие оборудования для отбора проб ГОСТ 17.1.5.04 и ГОСТ Р 51592. (РД 52.10.738-2010 [14]).

Как известно, в морских водах соединения фосфора могут находиться в трех основных состояниях: растворенное, коллоидное и взвешенное. Фосфор легко может переходить из одного состояния в другое, такое умение создает сложности при определении отдельных его форм. Чаще всего определение формы производится следующим образом. Если проба была отфильтрована, то она говорит о растворенных формах. При отсутствии фильтрации данная

проба покажет суммарное содержание фосфора. Взвешенные же соединения находят исходя из разности описанных выше форм. Определение ортофосфатов проводится с помощью реакции молибдата аммония и аскорбиновой кислоты. В результате образуется молибденовая синь. При определении количества полифосфатов их переводят в фосфаты (кислый гидролиз). Зачастую определить растворенные формы фосфора достаточно трудно из-за их неустойчивости и быстрого перехода их одного состояния в другое. Во избежание неопределенности используют термин «фильтруемые формы».

Таким образом, для получения достоверных данных по концентрациям фосфора важно соблюдать условия обработки и анализа проб. Например, фильтрация полученной пробы должна быть произведена быстро (почти сразу) через фильтр 0,45 мкм. Однако, стоит отметить, что в зарубежной практике отобранные пробы вовсе не фильтруются.

В данной работе использовались данные 48 станций мониторинга трех стран (всего их больше 50). Исследуемыми параметрами выступали: концентрация неорганического азота (нитритный, нитратный, аммонийный азот) и неорганического (фосфатного) фосфора. Значения представлены в мкмоль/л.

Работа заключается в сравнении соотношения Редфилда в восточной и западной частях Финского залива в различные сезоны года в течение 18 лет. Условная граница между восточной и западной частями Финского залива была проведена у острова Гогланд. Таким образом, данные восточной части были получены с 22 станций трех стран, данные западной части представлены 26 станциями Эстонии и Финляндии. Схема расположения станций с отметкой границы восточной и западной частей Финского залива представлена на рисунке 2.

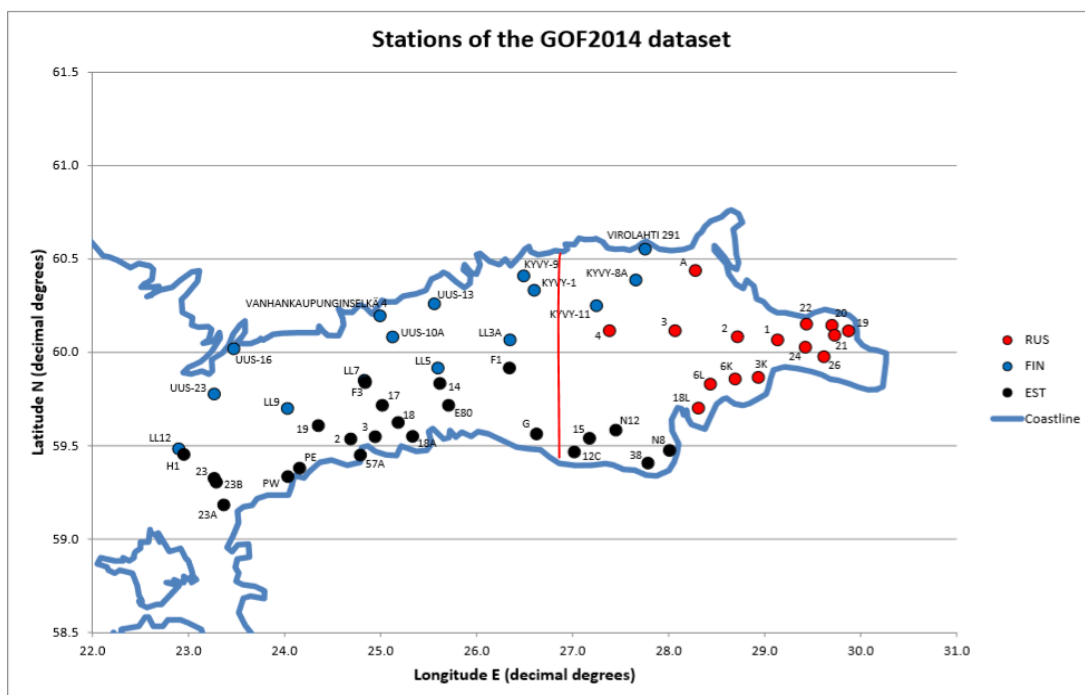


Рисунок 5 – Расположение станций мониторинга за состоянием водной среды на карте Финского залива

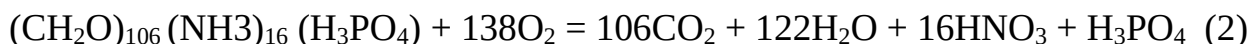
Для анализа изменчивости коэффициента Редфилда в восточной и западной части Финского залива были рассмотрены 3 выборки за каждый год. Рассматривались следующие сезоны: раннее лето (конец мая-июнь), позднее лето (август), осень (октябрь). Сведения по рассматриваемым сезонам имелись не на каждой станции, однако в целом можно сказать, что данных было достаточно для достоверной оценки изменчивости соотношения Редфилда по рассматриваемым сезонам года. Количество рассматриваемых данных, которые были использованы в работе, представлены в таблице 2. Количество значений азота за каждый период равно количеству значений фосфора.

Таблица 2 - Описание исходных данных, количество данных по каждому исследуемому параметру, период измерения

Период наблюдений	Количество значений по показателям N, P					
	Восток			Запад		
	июнь	август	октябрь	июнь	август	Октябрь
1996 г.	43	46	45	81	93	29
1997 г.	25	24	12	47	47	21
1998 г.	31	17	12	117	42	39
1999 г.	31	49	12	59	52	37
2000 г.	52	56	29	50	51	32
2001 г.	25	49	42	29	82	23
2002 г.	24	52	25	73	49	19
2003 г.	42	43	46	49	55	17
2004 г.	58	57	47	70	50	23
2005 г.	31	25	16	60	55	14
2006 г.	25	19	12	48	59	19
2007 г.	33	45	18	81	51	31
2008 г.	27	62	24	71	50	57
2009 г.	31	25	24	93	52	34
2010 г.	35	50	12	74	87	53
2011 г.	21	13	27	66	78	53
2012 г.	51	51	44	88	85	78
2013 г.	65	57	40	57	52	9

3.2 Методы исследования

Стехиометрическая модель Редфилда-Ричардса представляет собой процесс минерализации органического вещества в морской воде, который приводит к образованию растворенных неорганических фосфатов и нитратов. Модель выглядит следующим образом:



Согласно уравнению, классическое молярное соотношение между углеродом, азотом и фосфором в морской воде является постоянным и равно 106:16:1 [21]. Постоянство отношения азота к фосфору говорит о том, что рассматриваемые элементы поглощаются планктоном в отношении значений их концентраций, а после переходят в водную среду в таком же соотношении. Впервые этот факт был замечен и представлен в работе А. Редфилда [31]. Это отношение N:P, а также некоторые другие (O₂:P, O₂:S, Si:P) сейчас известны как Redfield ratio или соотношение Редфилда. Принято считать, что соотношение N:P по массе выше 17:1 свидетельствует о лимитировании первичной продукции фосфором, а отношение этих элементов ниже 10:1 говорит об ограничении азотом [30]. Концентрации растворенного неорганического азота и растворенного неорганического фосфора используются для оценки потенциального ограничения питательных веществ.

В различных условиях соотношение Редфилда неодинаково. Данный параметр находится в тесной взаимосвязи с преобладающим типом водорослей в воде, содержании питательных веществ и других особенностей. Однако Redfield ratio считается удобным инструментом для определения потенциального лимитирующего развития фитопланктона элемента в данных условиях. Концентрации углерода в морских водах превышают потребности организмов в 10 раз. Поэтому считается, что данный элемент не является

лимитирующим для роста и развития живых организмов. Модель Редфилда также не учитывает другие элементы, входящие в состав живого вещества (сера, железо, молибден, кобальт и т.д.). Это необходимо для заострения внимания на наиболее существенных элементах, требуемых для построения белка. Азот и фосфор содержатся в морских водах в небольших количествах, однако они способны значительно лимитировать количество первичной продукции водоема [10].

Отношение N/P, то есть концентрация растворенного неорганического азота (DIN) относительно концентрации растворенного неорганического фосфора (DIP) является ключевым параметром для многих экологических моделей. В экосистеме Балтийского моря соотношение Редфилда варьируется в разных бассейнах и в разные времена года. Отношение N/P питательных веществ различаются до и после весеннего цветения. Отмечается, что соотношение Редфилда в Балтийском море несколько выше классического, и это является нормой для данного региона. Предполагается, что для акватории Балтики отношение $N/P = 10:1$ подходит лучше, чем классическое соотношение Редфилда., а во время весеннего цветения наблюдается отношение данных компонентов как 6:1 [31]. Однако в любом случае модель является упрощенной, поскольку соотношение веществ находится в тесной зависимости от ряда природных процессов.

Стоит отметить, что в природных водах отношение N/P изменения питательных веществ до и после весеннего цветения не описывает отношение N/P поглощения питательных веществ. Однако для упрощения первое используют как индикатор последнего [31].

Для расчета коэффициентов Редфилда для трех выбранных сезонов (июнь, август, октябрь) за каждый год были рассмотрены концентрации фосфатного фосфора и минерального азота. Последний рассчитывался как сумма нитратных, нитритных и аммонийных форм.

Расчеты проводились с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel 2016. Это программа, созданная для работ с электронными

таблицами от корпорации Microsoft. Она предоставляет пользователям возможность статистической обработки данных, проведения расчетов по заданному алгоритму и графического отображения результатов [20].

Построение и анализ графиков соотношения Редфилда для каждого месяца производилось в программном обеспечении Statistica. Этот пакет был разработан в США фирмой StatSoft. Программное обеспечение предоставляет пользователю возможность работать с электронными таблицами, а также имеет графический интерфейс и функцию обмена данными. В программе Statistica можно проводить анализ данных, отображать результаты в табличном или графическом виде и создавать отчеты.

В Microsoft Office Excel 2016 была проведена работа по распределению данных по выбранным сезонам. По каждому рассматриваемому году было выбрано по три сезона в восточной и западной частях Финского залива. Были выбраны исследуемые станции и отобраны нужные показатели.

В результате проведенной работы с исходными данными в программе Statistica были построены облака точек распределения отношения минерального азота к минеральному фосфору и обозначены уравнения регрессии. Также был рассчитан коэффициент Редфилда для каждой выборки.

Для оценки достоверности построенных линейных моделей были построены доверительные интервалы (95%). Также были рассчитаны некоторые коэффициенты: коэффициент корреляции. Коэффициент детерминации и P level.

Коэффициент детерминации r^2 – это важный критерий для установления качества различных моделей. Он отражает долю общего разброса, который объясняется построенной регрессией. Если рассчитанный показатель будет больше 0,7 (более 70% случаев), то исходными данными такой модели можно интерпретировать для установления взаимосвязи и вынесения прогноза.

Коэффициент корреляции отражает степень связи между двумя переменными. Значение параметра может варьироваться от -1 до 1. Чем ближе коэффициент к 1, тем сильнее связь между величинами.

P level – это значимость уравнения регрессии. Если $P < 0,001$, можно говорить о том, что линия регрессии значима.

Существуют различные подходы к оценке соотношения Редфилда в зависимости от особенностей рассматриваемого водного объекта. Для глубинных зон мирового океана чаще всего исследуют только фотический слой (слой первичной продукции). Для водоемов небольшой глубины с сильным ветровым перемешиванием водной толщи (Финский залив) более рационально рассчитать соотношение Редфилда по всей водной толще.

Для оценки динамики коэффициента Редфилда в Финском заливе в течение 18 лет были рассчитаны средние значения показателя в восточной и западной части Финского залива. N:P соотношение представлено в виде среднего значения за водную толщу.

Для определения среднего годового соотношения Редфилда для каждого месяца было найдено среднее значение по всем N:P коэффициентам за данный промежуток времени. Жирным цветом отмечены значения, не включенные в анализ по причине недостатка исходных данных.

По результатам таблицы 3 можно выявить общую тенденцию: среднее значение соотношения Редфилда в восточной части Финского залива выше, чем в Западной его части. Это значит, что в восточной части основным элементом, лимитирующим первичную продукцию, является фосфор, тогда как к западной части – азот. Объяснить такую тенденцию можно тем, что в Восточной части Финского залива имеются крупные наземные точечные источники поступления фосфора в водную толщу.

Сезонная изменчивость в восточной части Финского залива отмечается в разнице N:P соотношения до и после летнего пика «цветения» фитопланктона. Средние значения коэффициента Редфилда в июне в основном меньше его средних значений в августе и октябре. Исключение составляют 1996, 2010 и 2013 гг. Пониженное соотношение минеральных форм азота к фосфору в июне объясняется наступлением «летнего

минимума», когда диатомовые водоросли уже израсходовали большую часть биогенных элементов в воде.

Таблица 3 – Значения соотношения Редфилда за исследуемый период

Период наблюдений	Значения соотношения Редфилда, N:P					
	Восточная часть ФЗ			Западная часть ФЗ		
	июнь	август	октябрь	июнь	август	октябрь
1996 г.	10,7:1	10,3:1	9,8:1	2,1:1	3,6:1	7,8:1
1997 г.	4,4:1	5,3:1	5,5:1	1,5:1	4,7:1	3,7:1
1998 г.	5,8:1	10,4:1	7,8:1	4,1:1	4,3:1	6,3:1
1999 г.	7,8:1	12,6:1	9,4:1	3,2:1	5,2:1	9,1:1
2000 г.	14,9:1	12,7:1	21,5:1	4:1	5,9:1	9:1
2001 г.	10,8:1	13,2:1	8,8:1	5,5:1	7,2:1	10,8:1
2002 г.	8,4:1	17,5:1	12,1:1	5,3:1	9:1	12,2:1
2003 г.	6,4:1	5,3:1	10,5:1	3,1:1	3,6:1	4,5:1
2004 г.	9:1	13,6:1	9,6:1	1,9:1	5:1	7,5:1
2005 г.	7,6:1	18,1:1	12,7:1	4,8:1	5,3:1	9,6:1
2006 г.	6,9:1	8,8:1	13,9:1	7:1	6:1	9,6:1
2007 г.	6,4:1	8,4:1	9,3:1	2,7:1	4,4:1	3,3:1
2008 г.	8:1	15,2:1	14:1	5,1:1	10,4:1	9,6:1
2009 г.	12,3:1	11,4:1	12,8:1	4,5:1	5,7:1	9,4:1
2010 г.	13,5:1	12,4:1	6,4:1	5,5:1	6,6:1	7,8:1
2011 г.	4,4:1	5:1	14,5:1	2,3:1	4,2:1	7,3:1
2012 г.	18,2:1	25,1:1	13,7:1	3,1:1	4,2:1	7,7:1
2013 г.	18,8:1	17,6:1	14,1:1	4,6:1	3,5:1	6,7:1

Дальнейшее увеличение соотношения Редфилда говорит о появлении сине-зеленых водорослей, способных ассимилировать азот из атмосферы. Так, средние значения N:P соотношения в августе достаточно высокие, что

объясняется резким увеличением первичной продукции и быстрым поглощением фосфора. В октябре в восточной части Финского залива устанавливается соотношение Редфилда, характерное для данной акватории ($N:P = 10:1$ [31]). Оно несколько ниже классического соотношения Редфилда из-за гидрологических и гидрохимических особенностей Балтийского региона. В осенний период за счет перемешивания водных масс биогенные элементы выносятся из глубинных слоев. В данном случае исключение составляет соотношение Редфилда в октябре 2010 года из-за недостатка исходных данных.

Межгодовая изменчивость соотношения Редфилда в восточной части Финского залива выражена слабо. Можно отметить некоторую тенденцию к увеличению данного показателя после 2009 года. Увеличение соотношения минеральных форм азота к фосфору свидетельствует об увеличении роли фосфора в производстве первичной продукции. Это может быть связано с внедрением новых технологий очистки сточных вод в городе Санкт-Петербург. Среднее значение $N:P$ соотношения в восточной части Финского залива за весь период наблюдения составил 11,2:1. Данное значение соответствует отношению питательных элементов в Балтийском регионе.

Сезонная изменчивость соотношения Редфилда в западной части Финского залива прослеживается в разнице отношения до и после летнего пика «цветения» фитопланктона. Значения рассматриваемого коэффициента за июнь за каждый год меньше значений, выявленных для августа и октября. Это связано с тем, что в июне завершается весенний пик «цветения» водорослей и наступает летний минимум. В это время расходуется большая часть азота, что приводит к лимитированию роста диатомовых водорослей.

В августе и октябре устанавливаются значения близкие к характерным для данного региона (около 10:1). При этом $N:P$ соотношение в августе в среднем меньше, данного параметра в октябре. Объяснить это можно тем, что за летний период сине-зеленые водоросли в процессе своей жизнедеятельности ассимилировали дополнительное количество азота.

Однако, в среднем значения N:P соотношения в западной части несколько меньше, чем в восточной части.

Межгодовая изменчивость коэффициента Редфилда в западной части Финского залива выражена слабо. Среднее значение коэффициента Редфилда в данном регионе составляет 5,8.

Также в таблице 3 цветом отмечены максимальные (синий) и минимальные (розовый) значения Редфилда по годам и сезонам. Практически все минимальные значения коэффициента отмечаются в 1997 году. Этот год отличается аномально жарким летом. В этот год зафиксирована минимальная концентрация азота в водах Финского залива. Максимальные значения N:P соотношения встречаются с 2000 по 2013 г. В их распределении не прослеживается явная тенденция.

В таблице 4 были рассчитаны средние годовые значения N:P соотношения для восточной и западной части Финского залива. Цветом отмечены максимальные (синий) и минимальные (розовый) значения в рассматриваемом периоде.

Минимальные значения N:P соотношения выявлены в 1997 году. Этот год отличается пониженной концентрации азота в рассматриваемом заливе. Максимальное значение параметра восточной части зафиксировано в 2013 году, в западной – в 2002 году.

По результатам таблицы 4 можно проследить динамику изменения соотношения Редфилда в течение 18 лет. В восточной части Финского залива коэффициент изменяется волнообразно, то повышаясь, то понижаясь. Аналогичная ситуация наблюдается и в западной части. При этом средние значения N:P соотношения в восточной части во всех случаях выше средних значений в западной части. Это объясняется различием в гидрологических и гидрохимических условиях рассматриваемых бассейнов.

Таблица 4 – Среднегодовые значения N:P соотношения в Финском заливе

Год	Восточная часть	Западная часть
1996 г.	10,3	4,5
1997 г.	5,1	3,3
1998 г.	8	4,9
1999 г.	9,9	5,8
2000 г.	16,4	6,3
2001 г.	10,9	7,8
2002 г.	12,7	8,8
2003 г.	7,4	3,7
2004 г.	10,7	4,8
2005 г.	12,8	6,6
2006 г.	9,9	7,5
2007 г.	8	3,5
2008 г.	12,4	8,4
2009 г.	12,2	6,5
2010 г.	10,8	6,6
2011 г.	8	4,6
2012 г.	19	5
2013 г.	16,8	4,9

В таблице 5 представлены средние значения коэффициента Редфилда за рассматриваемый период по сезонам.

Таблица 5 – Средние сезонные значения N:P соотношения в Финском заливе

Восточная часть ФЗ			Западная часть ФЗ		
июнь	август	октябрь	июнь	август	октябрь
9,7:1	12,4:1	11,5:1	3,9:1	5,5:1	7,9:1

По результатам таблицы 5 можно проследить тенденцию постепенного увеличения соотношения минерального азота к фосфору с июня по октябрь. Меньшие значения за июнь свидетельствуют об ограничении роста продуцентов азотом после весеннего пика «цветения». Увеличение коэффициента Редфилда в октябре говорит о накоплении азота за летний период за счет его активной ассимиляции сине-зелеными водорослями.

Средние значения N:P соотношения, рассмотренные за 18 лет, свидетельствуют о том, что данный параметр несколько ниже классического отношения Редфилда. Для Финского залива действительно лучше подходит модель, выдвинутая З. Ванном и Л. Джонассом [31]. Модель гласит, что для Балтийского моря характерно пониженное значение отношения минерального азота к минеральному фосфору. Оно составляет 10:1, а во время весеннего цветения водорослей – 6:1.

В приложении А представлены графики среднегодового соотношения Редфилда в Финском заливе. Общая тенденция выглядит следующим образом: линия регрессии имеет больший угол в графиках для западной части Финского залива. На графиках восточной части линия регрессии располагается под острым углом. Это значит, что на западе преобладают повышенные концентрации фосфора и пониженные – азота (по сравнению с восточной частью). В приложении Б представлены графики сезонной изменчивости соотношения Редфилда в Финском заливе.

Коэффициент корреляции практически в каждом случае больше 0,7, что говорит о наличии связи между концентрациями минерального фосфора и минерального азота. Уровень значимости регрессии $P < 0,001$, что говорит о том, что регрессия значима. Коэффициент детерминации имеет различные значения в диапазоне 0,3 – 0,8. Такие значения связаны с сильной изменчивостью параметров в связи с внешними факторами.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был выполнен анализ изменчивости соотношения Редфилда в Финском заливе по результатам международного мониторинга. Анализ проводился для восточной и западной частей водоема. Граница между ними была условно проведена у острова Гогланд.

Рассмотрение этих двух бассейнов позволяет глубже изучить проблему эвтрофирования с учетом локальных гидрологических и гидрохимических особенностей. Качество вод восточной части залива во многом определяется влиянием стока реки Невы и стоящим на ее берегах городом Санкт-Петербург. Бассейн представляет собой переходный район от пресноводного, бассейна к солоноватому. Восточная часть Финского залива является мелководной, ей присущи все характеристики эстуария. В восточной части Финского залива более выражено весеннее «цветение» водорослей, соответственно, здесь в большей степени происходит накопление неорганических питательных веществ в зимний период.

Западная часть Финского залива является более глубоководной, здесь господствуют морские экосистемы, а на дне наблюдаются гипоксические условия. На гидрологический и гидрохимический режим данной акватории большое влияние оказывают заливы соленых вод из Центральной Балтики. Замечена тенденция сдвига сроков весеннего цветения. В западной части оно происходит в апреле, а в восточной – в мае. Также отмечается тенденция уменьшения отношения минерального азота к минеральному фосфору с востока на запад.

Анализ соотношения Редфилда в Финском заливе показал следующие результаты. Общая тенденция динамики N:P соотношения выглядит следующим образом: среднее значение соотношения Редфилда в восточной части Финского залива выше, чем в западной его части. Это значит, что в

восточной части основным элементом, лимитирующим первичную продукцию, является фосфор, тогда как к западной части – азот. Объяснить такую тенденцию можно тем, что в восточной части Финского залива имеются крупные наземные точечные источники поступления фосфора в водную толщу.

Сезонная изменчивость в восточной части Финского залива отмечается в разнице N:P соотношения до и после летнего пика «цветения» фитопланктона. Средние значения коэффициента Редфилда в июне в основном меньше его средних значений в августе и октябре. Это объясняется наступлением «летнего минимума», когда диатомовые водоросли уже израсходовали большую часть биогенных элементов. Дальнейшее увеличение соотношения Редфилда говорит о появлении сине-зеленых водорослей, способных ассимилировать азот из атмосферы. В октябре в восточной части Финского залива устанавливается соотношение Редфилда, характерное для данной акватории ($N:P = 10:1$). В осенний период за счет перемешивания водных масс биогенные элементы выносятся из глубинных слоев. Межгодовая изменчивость соотношения Редфилда в восточной части Финского залива выражена слабо. Среднее значение N:P соотношения в восточной части Финского залива за весь период наблюдения составил 11,2:1. Значение соответствует отношению питательных элементов в Балтийском регионе.

Сезонная изменчивость соотношения Редфилда в западной части Финского залива прослеживается в разнице отношения до и после летнего пика «цветения» фитопланктона. Значения рассматриваемого коэффициента за июнь в основном меньше значений, выявленных для августа и октября. Это связано с тем, что в июне завершается весенний пик «цветения» водорослей и наступает летний минимум. В это время расходуется большая часть азота, что приводит к лимитированию роста диатомовых водорослей. В августе и октябре устанавливаются значения близкие к $N:P=10:1$. Межгодовая изменчивость коэффициента Редфилда в западной части

Финского залива выражена слабо. Среднее значение коэффициента Редфилда в данном регионе составляет 5,8.

Практически все минимальные значения коэффициента отмечаются в 1997 году. Этот год отличается аномально жарким летом. В этот год зафиксирована минимальная концентрация азота в водах Финского залива. Максимальное значение параметра восточной части зафиксировано в 2013 году, в западной – в 2002 году.

Динамика изменения соотношения Редфилда в течение 18 лет выглядит следующим образом. В восточной части Финского залива коэффициент изменяется волнообразно, то повышаясь, то понижаясь. Аналогичная ситуация наблюдается и в западной части. При этом средние значения N:P соотношения в восточной части во всех случаях выше средних значений в западной части. Это объясняется различием в гидрологических и гидрохимических условиях рассматриваемых бассейнов.

Рассматривая средние значения отношения по сезонам, можно проследить тенденцию постепенного увеличения соотношения минерального азота к фосфору с июня по октябрь за каждый год.

Средние значения N:P соотношения, рассмотренные за 18 лет, свидетельствуют о том, что данный параметр несколько ниже классического отношения Редфилда. Для Финского залива действительно лучше подходит модель, выдвинутая З. Ванном и Л. Джонассом [31]. Модель гласит, что для Балтийского моря характерно пониженное значение отношения минерального азота к минеральному фосфору. Оно составляет 10:1, а во время весеннего цветения водорослей – 6:1. Оно ниже классического соотношения Редфилда (N:P=16:1) из-за гидрологических и гидрохимических особенностей Балтийского региона.

Список использованной литературы

- 1 Алекин О.А. Химия океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. 232 с.
- 2 Алимов А. Ф., Голубков С. М. Изменения в экосистемах восточной части Финского залива // Вестник Российской академии наук. 2008. №3.
- 3 Буканова Т.В. Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным. Диссертация на соиск. уч. степ. Канд. геогр. н.: 25.00.28 / Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук. Калининград, 2014. 142 стр.
- 4 Волощук, Е.В. Оценка влияния абиотических и биотических факторов на экологическое состояние придонных вод и донных отложений Финского залива в условиях изменения климата [Текст]: дис. на соиск. науч. степ. канд. геогр. наук: 25.00.36/ Российский государственный гидрометеорологический университет. СПб, 2016. 122 с.
- 5 Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 03. Балтийское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Справочник. // СПб: Гидрометеиздат, 1992. — 451 стр.
- 6 Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 03. Балтийское море. Выпуск 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Справочник. // СПб: Гидрометеиздат, 1994. — 435 стр.
- 7 ГУП «Водоканал Санкт-Петербург». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.vodokanal.spb.ru/> (дата обращения: 30.04.2019).
- 8 Документы ХЕЛКОМ :: Хельсинкская конвенция по Балтийскому морю [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://helcom.ru/helcom_documents/helsinki_convention (дата обращения: 24.04.2019).

9 Ершова А.А. Комплексная оценка поступления биогенных веществ с водосбора реки Нева в восточную часть Финского залива. Диссертация на соиск. уч. степ. Канд. геогр. н.: 25.00.36 / Российский государственный гидрометеорологический университет. Санкт-Петербург, 2013. 28 стр.

10 Защита Балтийского моря [Электронный ресурс] – Режим доступа:

http://www.vodokanal.spb.ru/kanalizovanie/ekologiya_baltijskogo_morya/ (дата обращения: 25.04.2019).

11 Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2011. – Под ред. Коршенко А.Н., Обнинск, «Артифекс», 2012, 196 с.

12 Массовая концентрация азота нитратного в морской воде. Методика измерений фотометрическим методом после восстановления в кадмиевом редуторе [Текст]: РД 52.10.745 – 2010.

13 Массовая концентрация азота нитритного в морских водах. Методика измерений фотометрическим методом с реактивом Грисса [Текст]: РД 52.10.740-2010.

14 Массовая концентрация фосфатов в морских водах. Методика измерений фотометрическим методом [Текст]: РД 52.10.738-2010

15 Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом"(утв. Росгидрометом 27.03.2006) [Текст]: РД 52.24.382-2006

16 План действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю / СПб.: Диалог, 2008. – 112 с. ISBN 978-5-903053-50-6

17 ПРЕСТО (Проект по сокращению эвтрофикации балтийского моря сегодня) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.prestobalticsea.eu> (дата обращения: 25.04.2019 г.).

18 Савчук О.П., Вулфф Ф. Круговорот азота и фосфора в открытой Балтике // Проблемы исследования и математического моделирования

экосистемы Балтийского моря: Международный проект «Балтика». Спб.: Гидрометеиздат, 1997. Вып. 5. С. 63-103.

19 Сапожников В.В., Метревели М.П. «Стехиометрическая модель органического вещества – основа количественного изучения продукционно-дистракционных процессов в океане». Труды ВНИРО, 2015. Том 155.

20 Справка по Excel [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://support.office.com/ru-ru/excel>

21 Усенков С.М. Донные отложения как индикаторы загрязнения восточной части Финского залива. Навигация и гидрография. 2005. № 20-21. С. 164-175.

22 Фрумин Г. Т. «Распределение фосфора общего по суббассейнам Балтийского моря» (журнал «Экологическая химия», 2012, 21(4); 199–204).

23 Шапрова О.В., Ерёмина Т.Р., Ланге Е.К. «Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений» Ученые записки №44.

24 Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Вып. 5, часть 2. Гидрометеорологические, гидрохимические, гидробиологические, геологические условия и динамика вод Финского залива / Под ред. И.Н. Давидана, О.П. Савчука СПб: Гидрометеиздат, 1997. - 450 с.

25 Finnish Environment Institute (SYKE) > Theme: Sustainable management [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.syke.fi/en-US/Research_Development/Sustainable_management_of_the_Baltic_Sea_and_freshwater_resources/An_extraordinarily_extensive_review_of_t\(40243](http://www.syke.fi/en-US/Research_Development/Sustainable_management_of_the_Baltic_Sea_and_freshwater_resources/An_extraordinarily_extensive_review_of_t(40243) (дата обращения: 24.04.2019).

26 HELCOM, 2013 Approaches and methods for eutrophication target setting in the Baltic Sea region. Balt. Sea Environ. Proc. No. 133.

27 HELCOM. Development of tools for assessment of eutrophication in the Baltic Sea // Baltic Sea environmental proceedings. 2006. № 104. 64 p.

28 HELCOM. Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region. // Baltic Sea Environment Proceedings. 2009. № 115B. 148 p.

29 Leppäkoski E. and Olenin S. The Meltdown of Biogeographical Peculiarities of the Baltic Sea: The Interaction of Natural and Man-made Processes // Ambio. 2001. V. 30 (4–5). P. 202–209.

30 Petri Ekholm, N:P RATIOS IN ESTIMATING NUTRIENT LIMITATION IN AQUATIC SYSTEMS. Finnish Environment Institute, 2008

31 Wan, Z., Jonasson, L., and Bi, H.: N/P ratio of nutrient uptake in the Baltic Sea, Ocean Sci., 7, 693-704, 2011.

Приложение А – Графики среднегодового N:P соотношения в Финском заливе

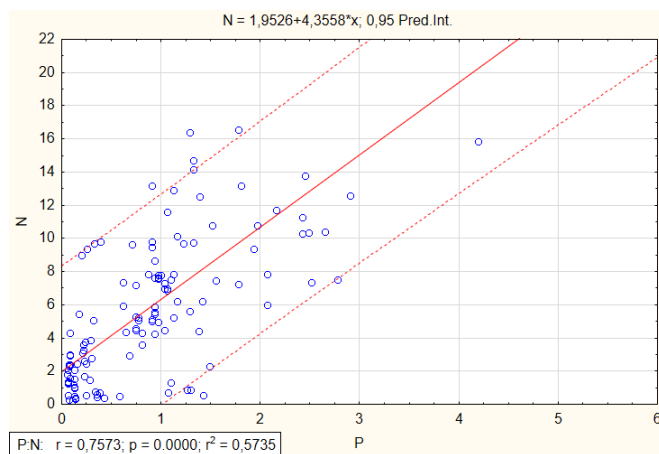


Рисунок 1 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 1996 году

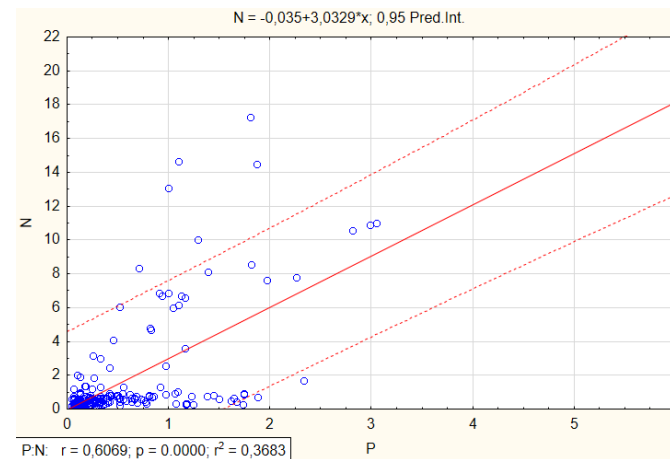


Рисунок 1.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 1996 году

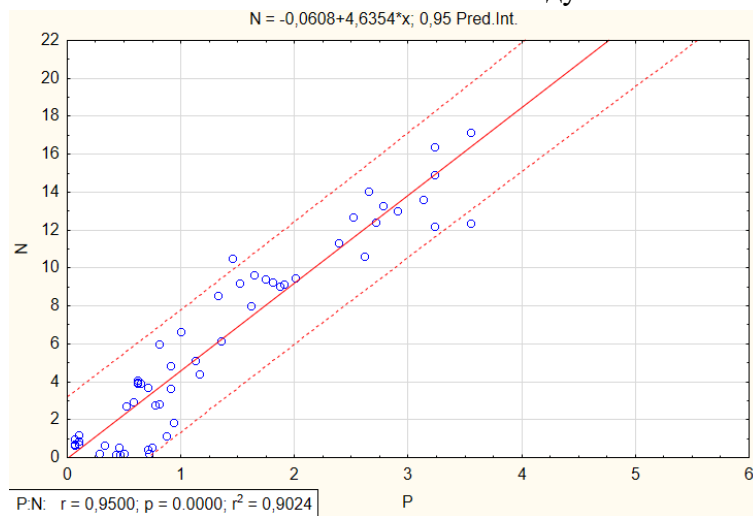


Рисунок 2 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 1997 году

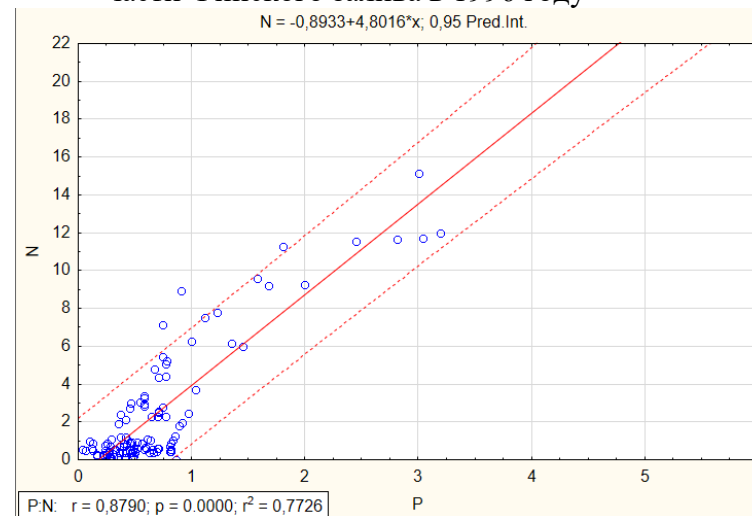


Рисунок 2.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 1997 году

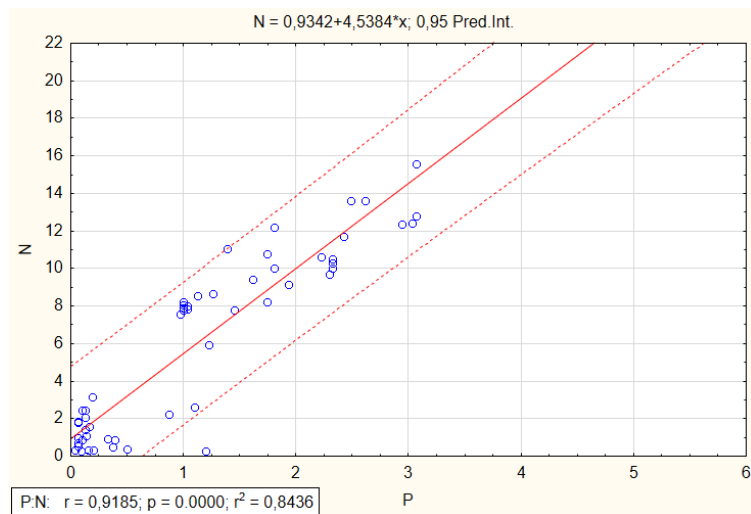


Рисунок 3 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 1998 году

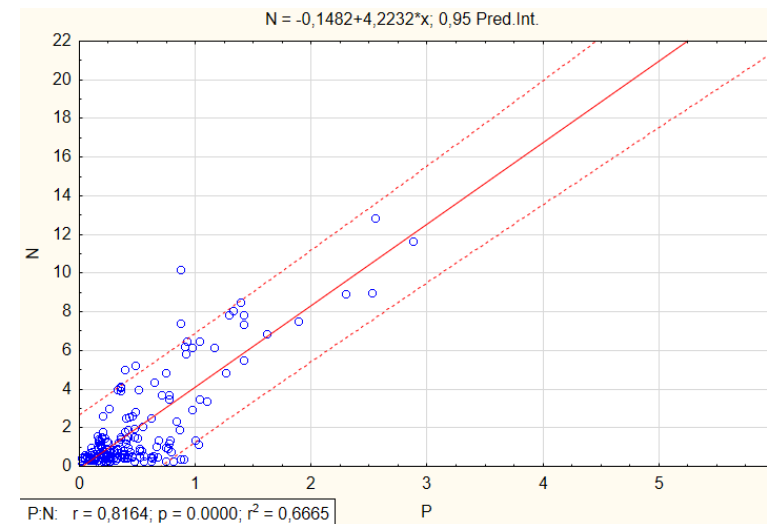


Рисунок 3.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 1998 году

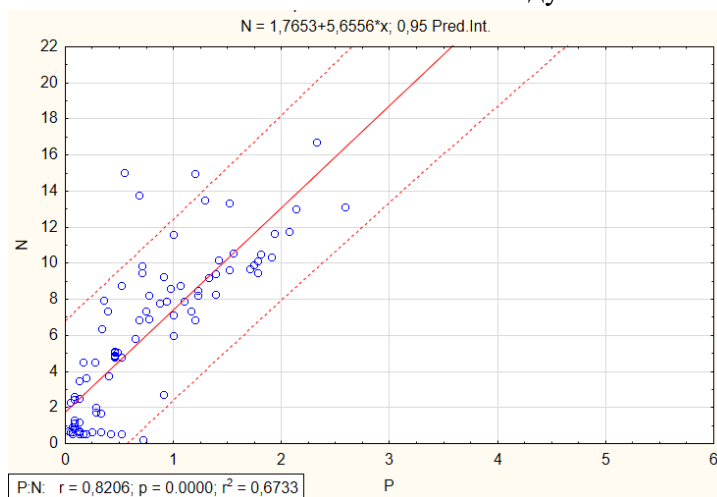


Рисунок 4 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 1999 году

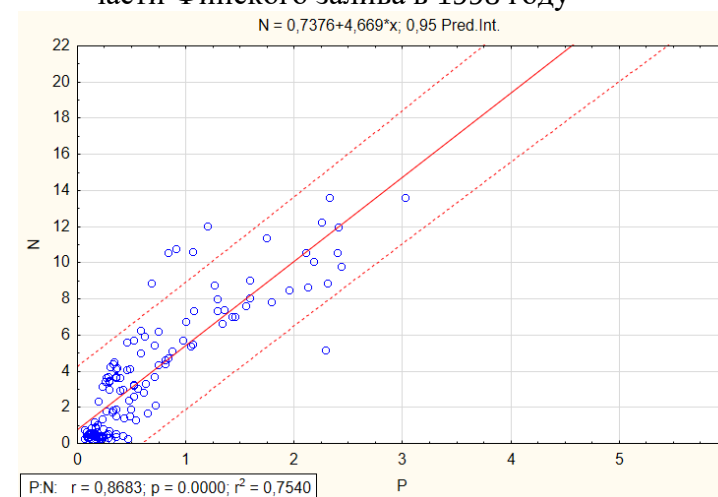


Рисунок 4.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 1999 году

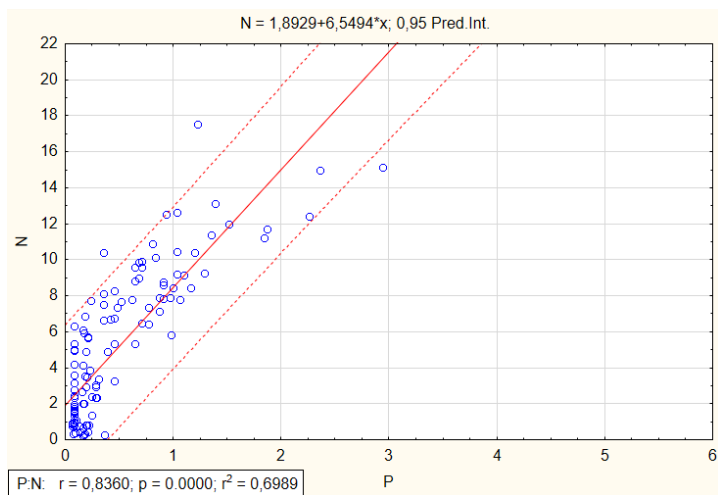


Рисунок 5 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2000 году

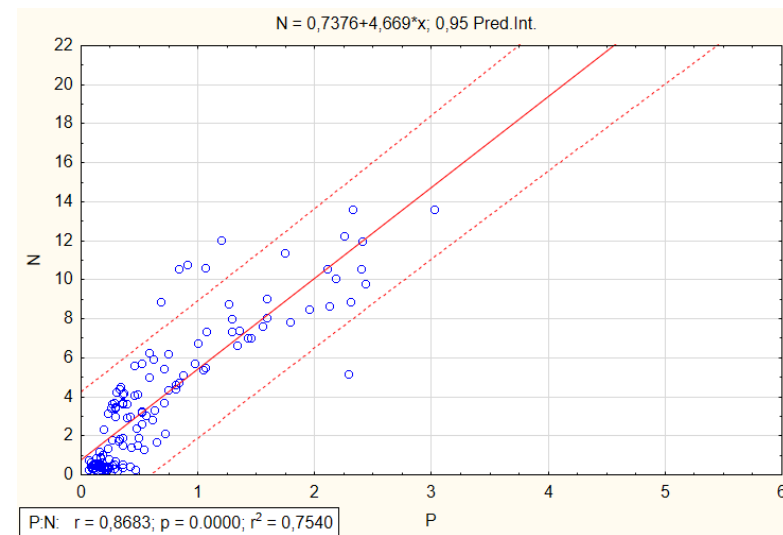


Рисунок 5.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2000 году

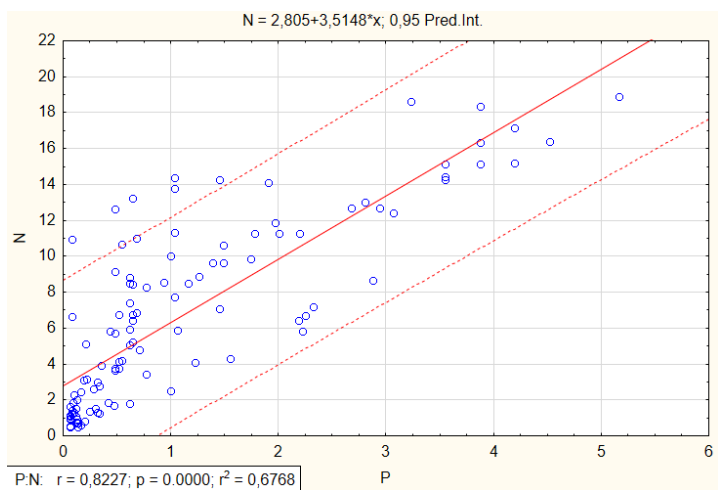


Рисунок 6 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2001 году

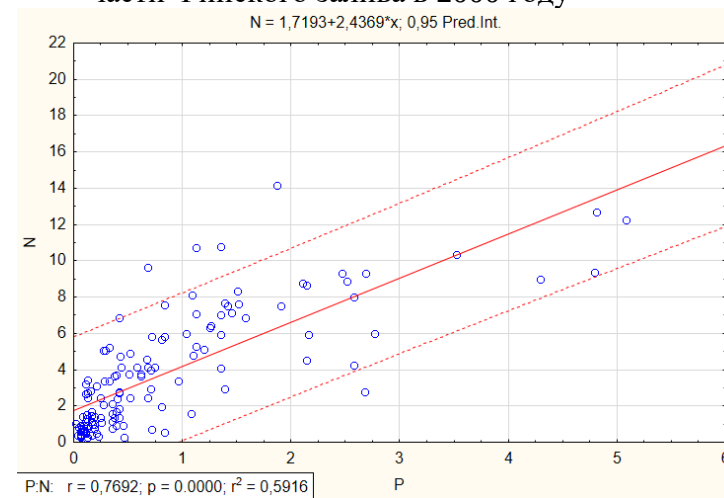


Рисунок 6.1 - среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2001 году

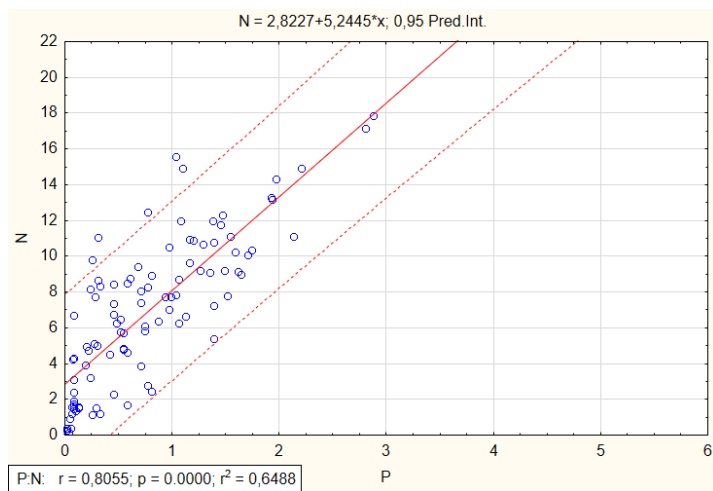


Рисунок 7 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2002 году

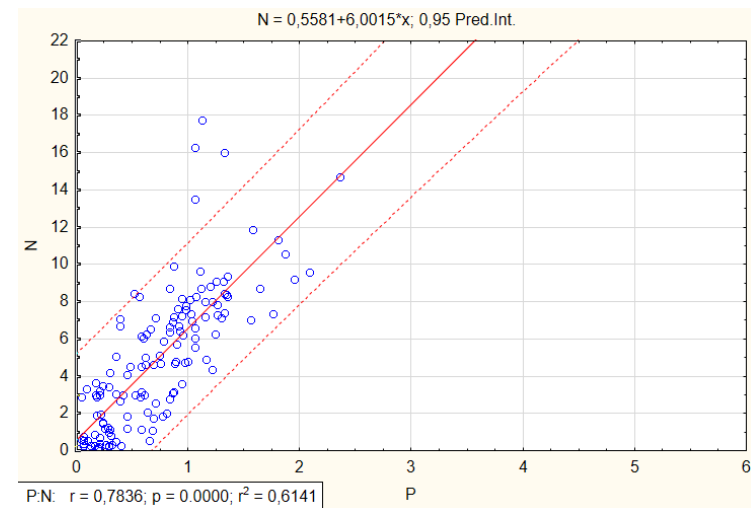


Рисунок 7.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2002 году

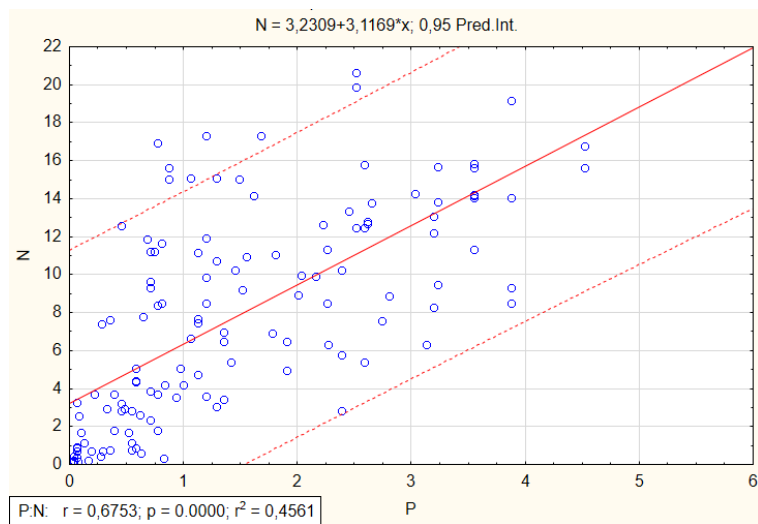


Рисунок 8 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2003 году

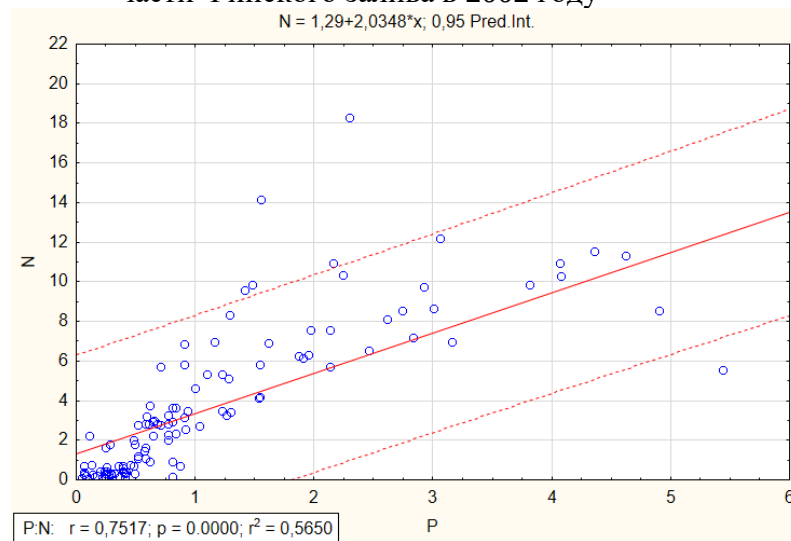


Рисунок 8.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2003 году

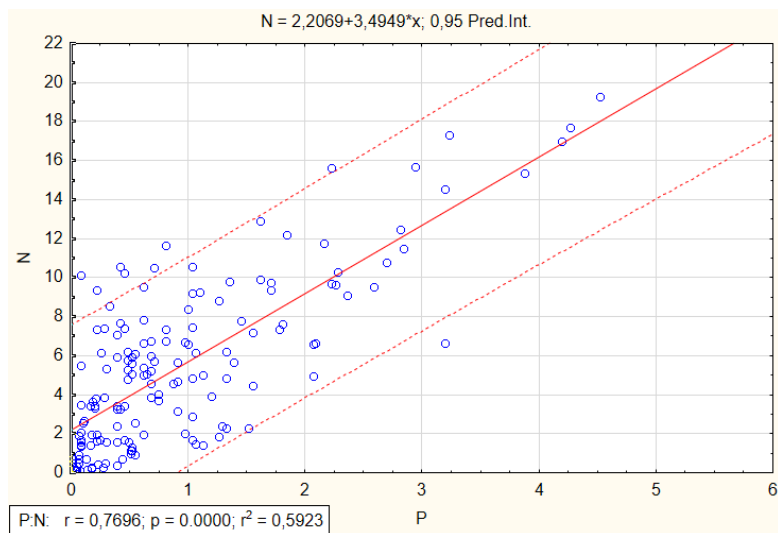


Рисунок 9 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2004 году

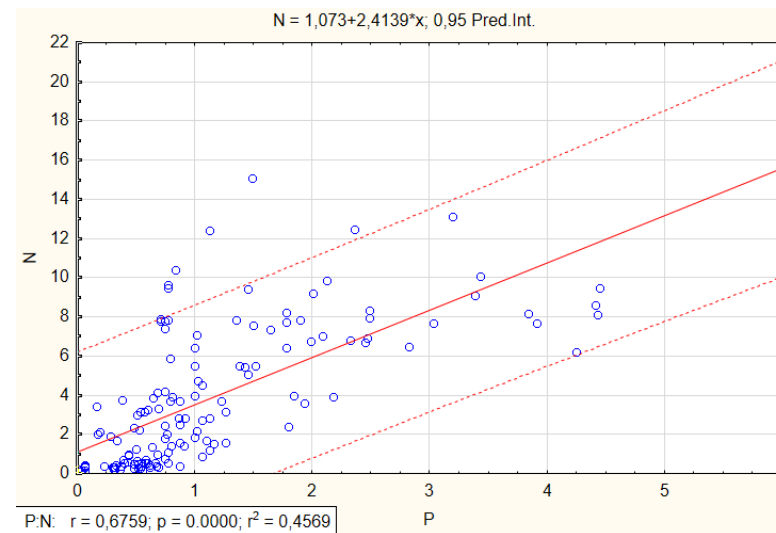


Рисунок 9.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2004 году

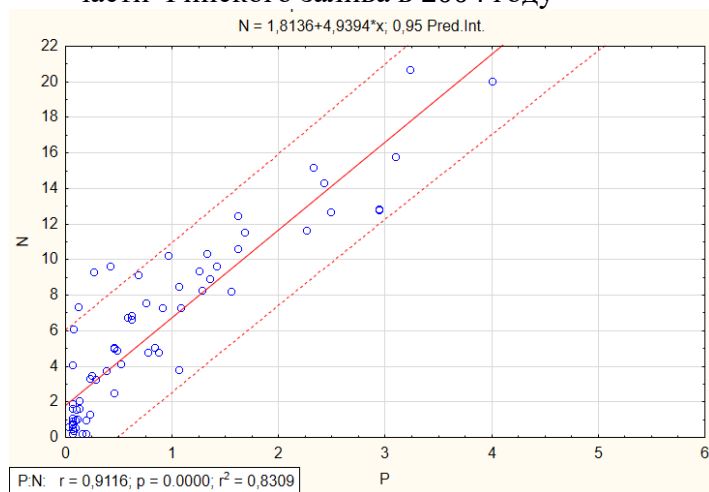


Рисунок 10 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2005 году

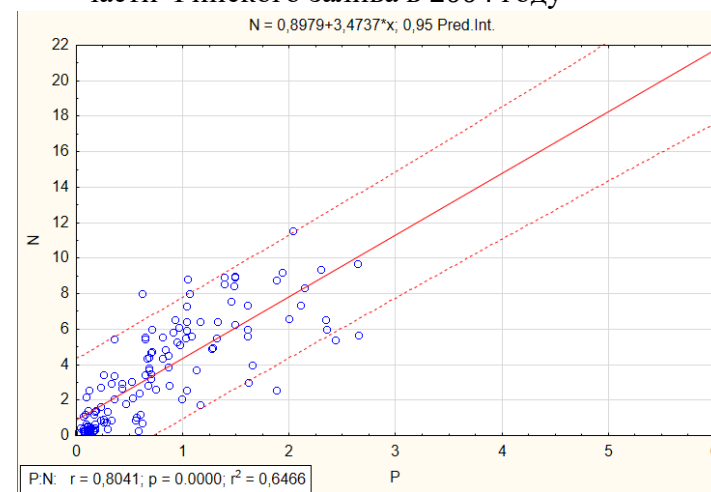


Рисунок 10.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2005 году

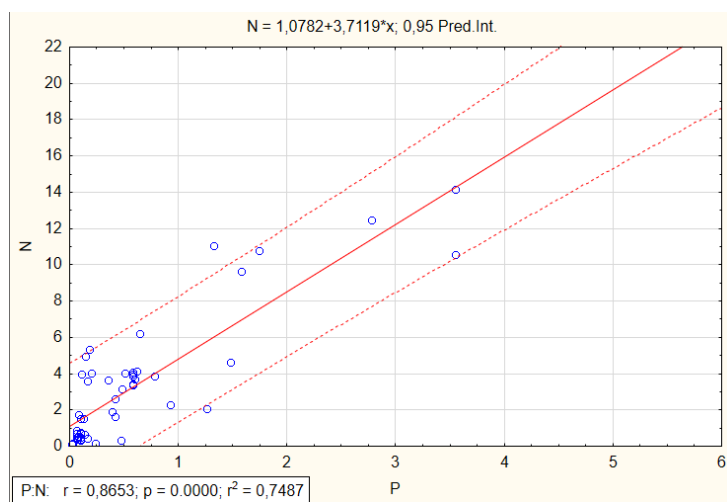


Рисунок 11 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2006 году

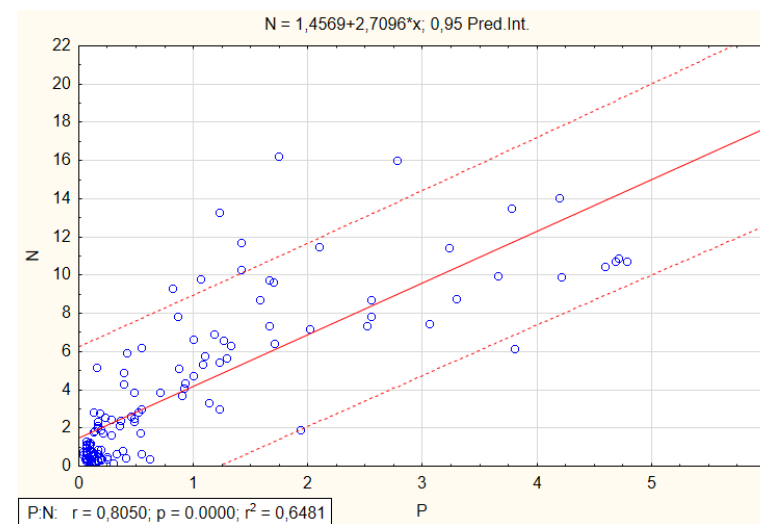


Рисунок 11.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2006 году

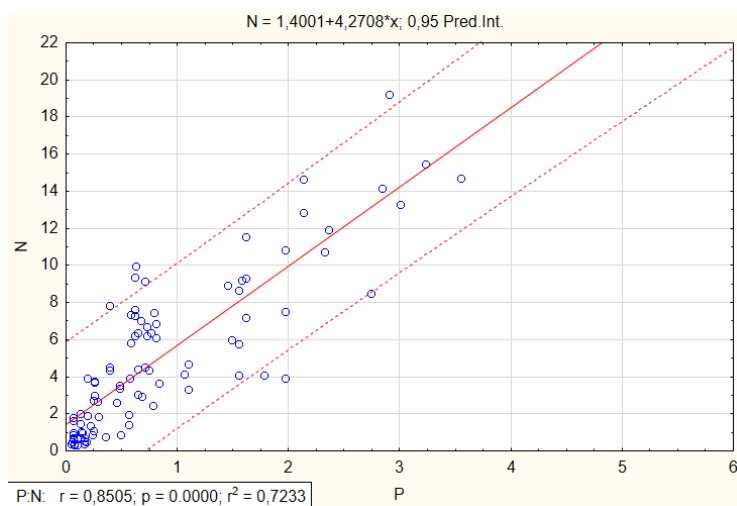


Рисунок 12 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2007 году

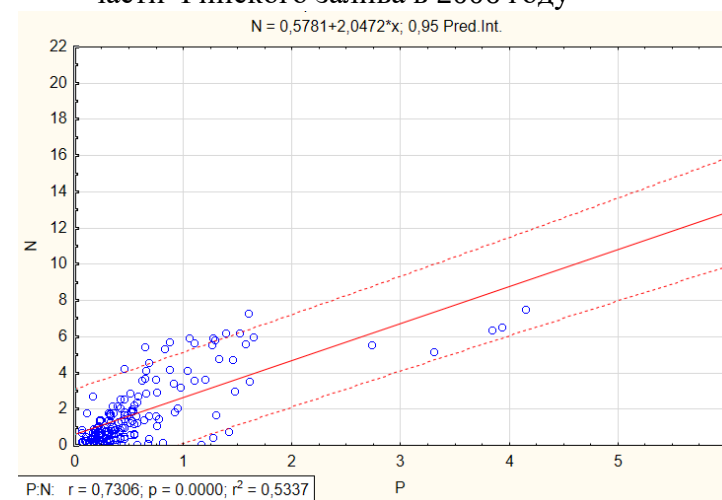


Рисунок 12.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2007 году

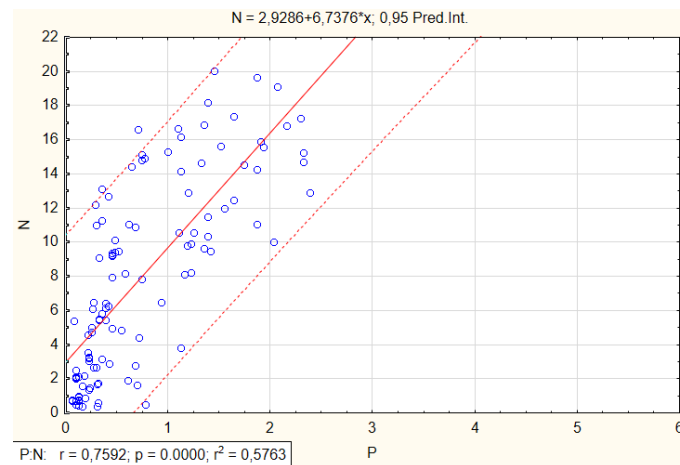


Рисунок 13 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2008 году

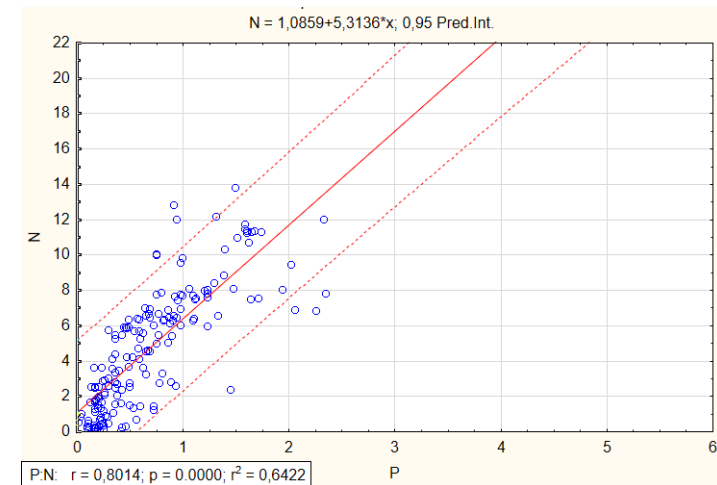


Рисунок 13.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2008 году

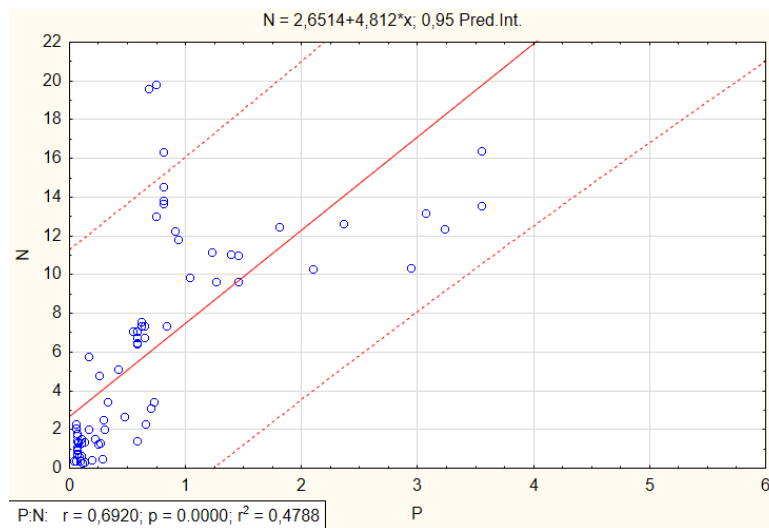


Рисунок 14 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2009 году

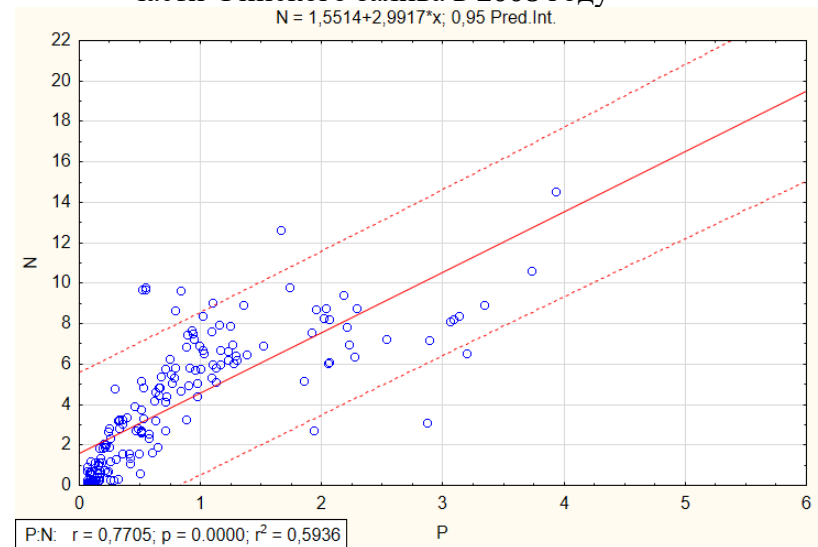


Рисунок 14 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2009 году

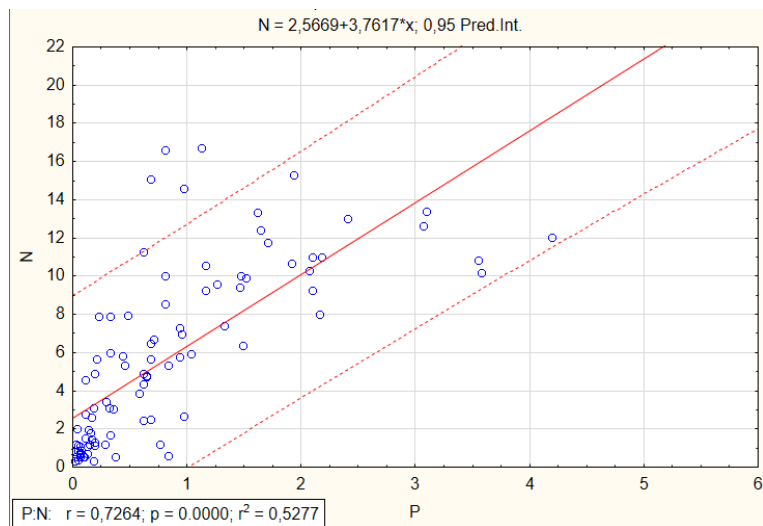


Рисунок 15 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2010 году

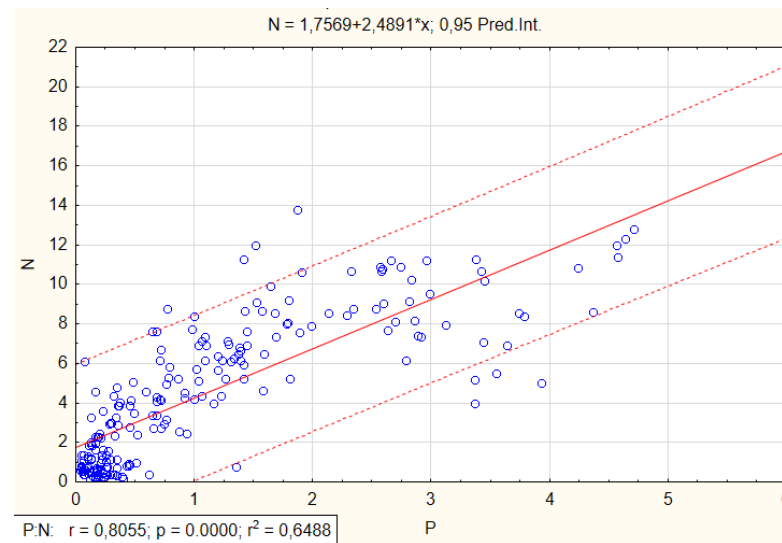


Рисунок 16 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2010 году

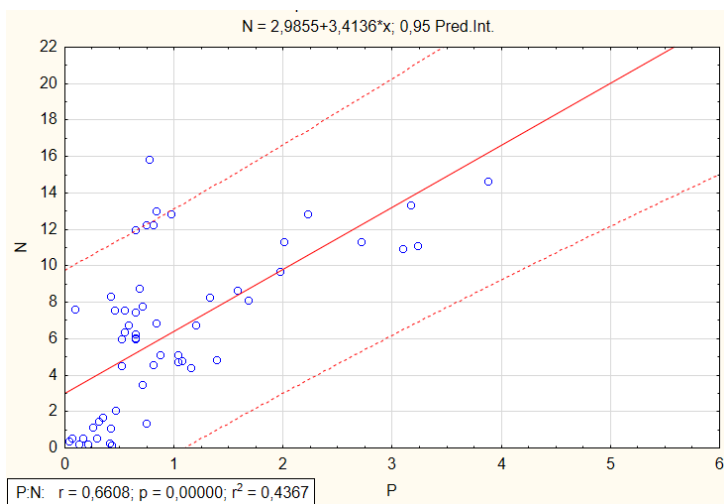


Рисунок 16 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2011 году

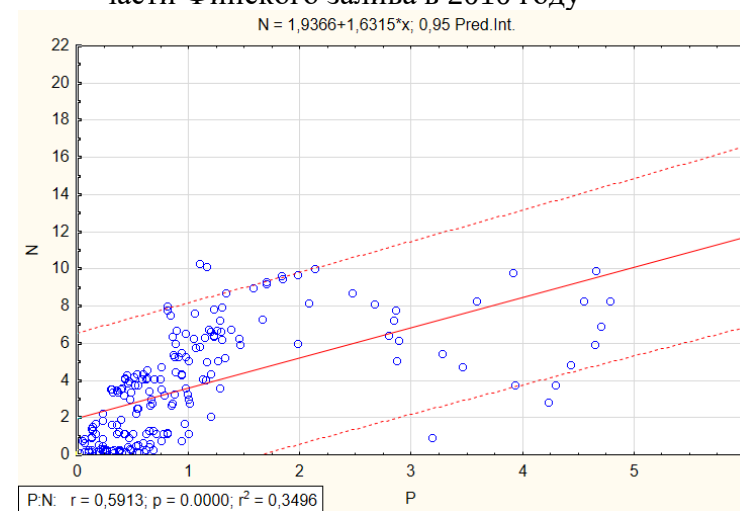


Рисунок 16.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2011 году

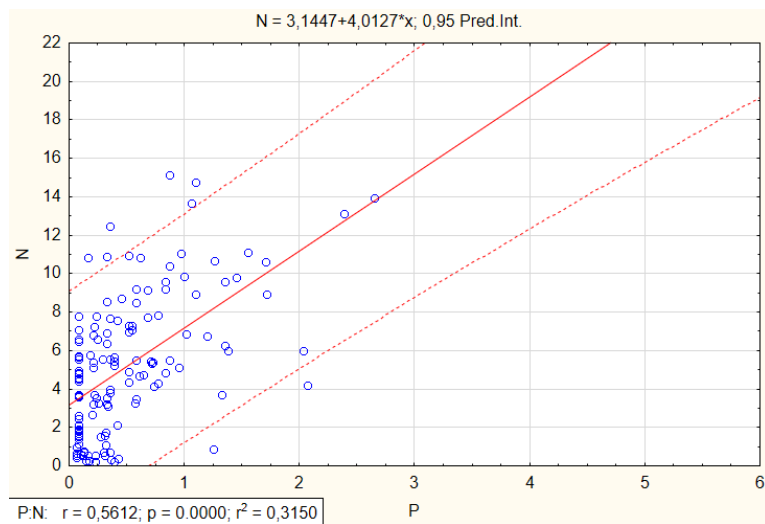


Рисунок 17 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2012 году

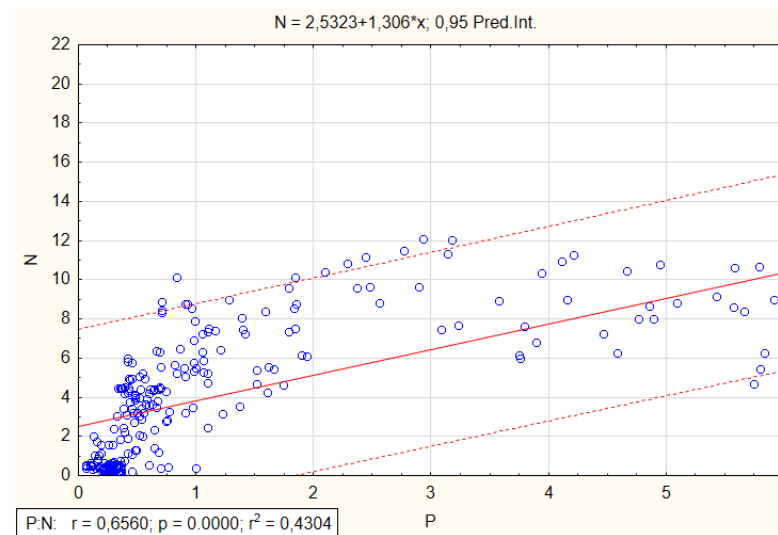


Рисунок 17.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2012 году

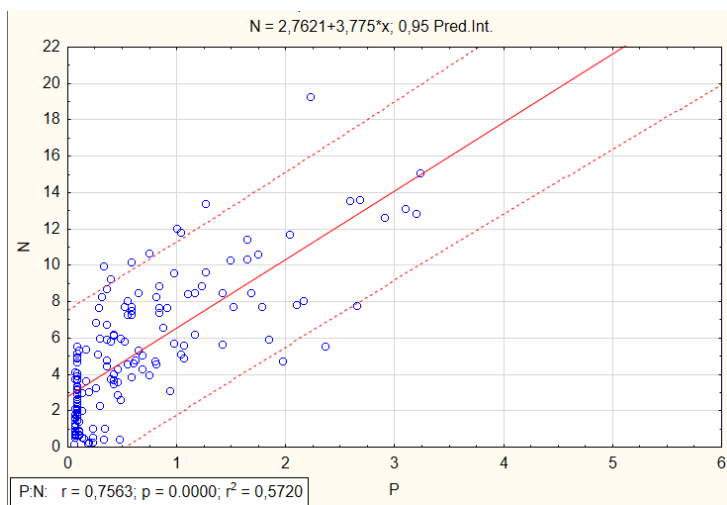


Рисунок 18 – среднегодовое N:P соотношение в восточной части Финского залива в 2013 году

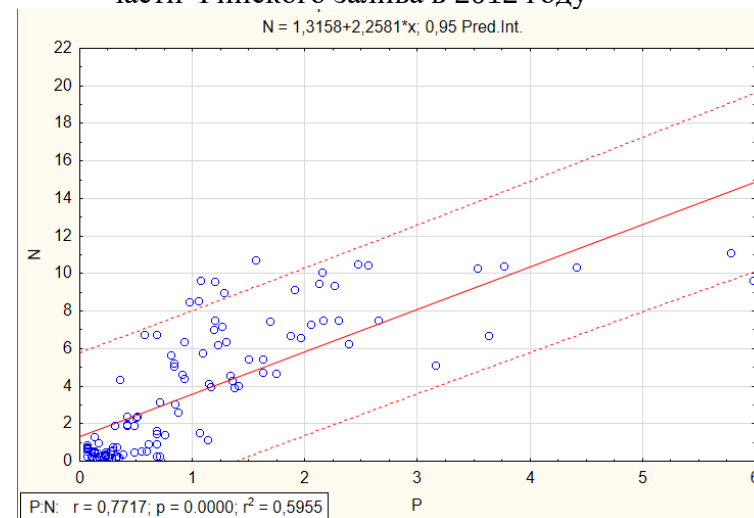


Рисунок 18.1 – среднегодовое N:P соотношение в западной части Финского залива в 2013 году

Приложение В – Графики N:P соотношения Редфилда по сезонам

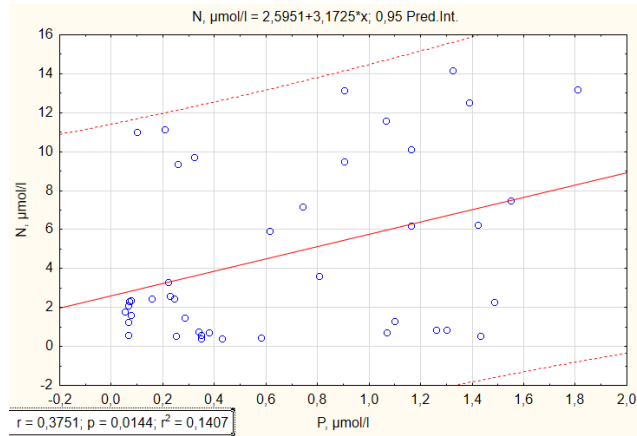


Рисунок 1 – N:P соотношение в Восточной части ФЗ, июнь, 1996

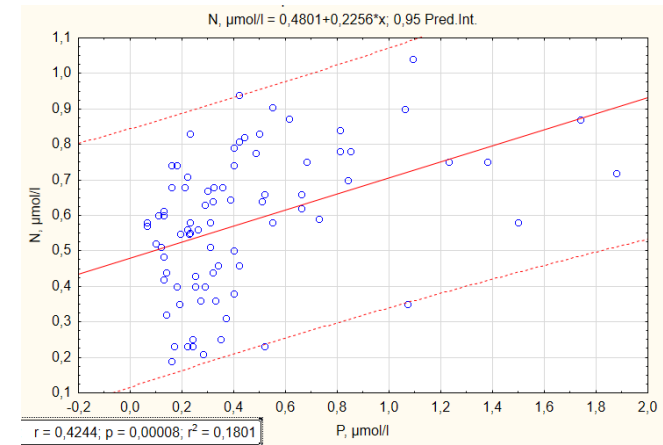


Рисунок 1.1 – N:P соотношение в Западной части ФЗ, июнь 1996

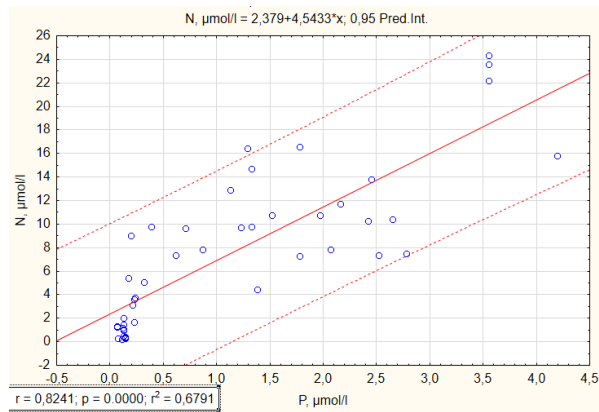


Рисунок 1.2 – N:P соотношение в Восточной части ФЗ, август, 1996

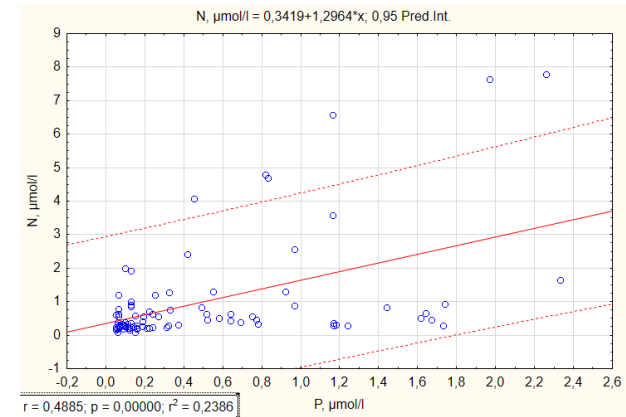


Рисунок 1.3 – N:P соотношение в Западной части ФЗ, август, 1996

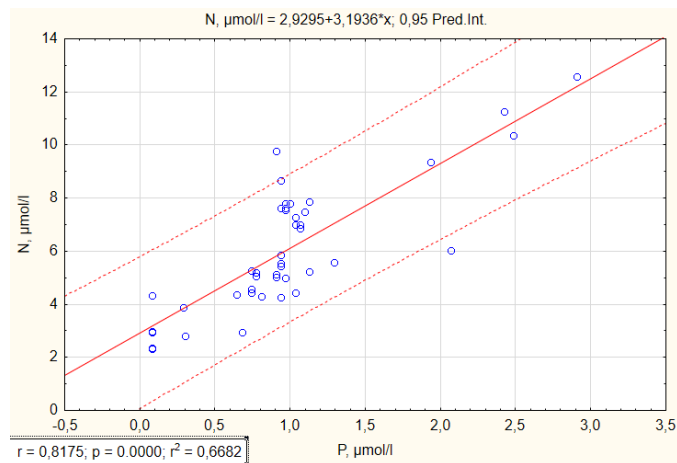


Рисунок 1.4 – N:P соотношение в Восточной части ФЗ, октябрь, 1996

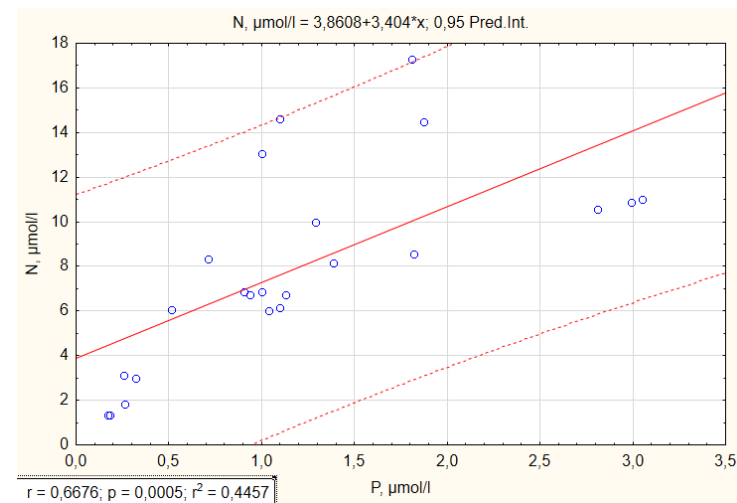


Рисунок 1.5 – N:P соотношение в Западной части ФЗ, октябрь, 1996

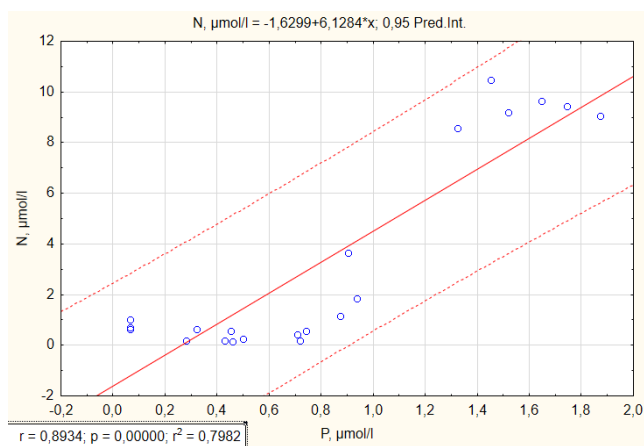


Рисунок 2 – N:P соотношение, Восток, июнь, 1997

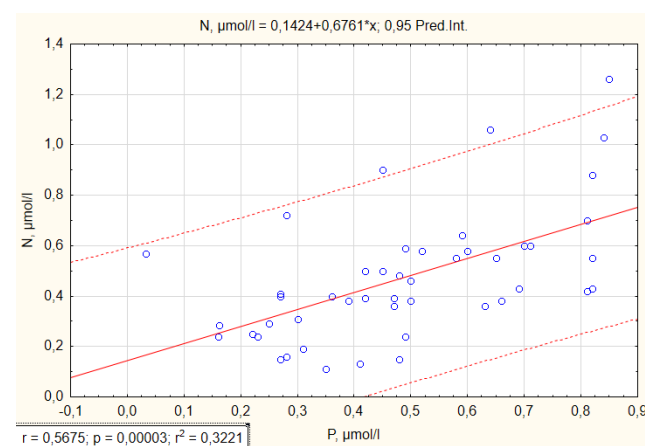


Рисунок 2.1 - N:P соотношение, Запад, июнь 1997

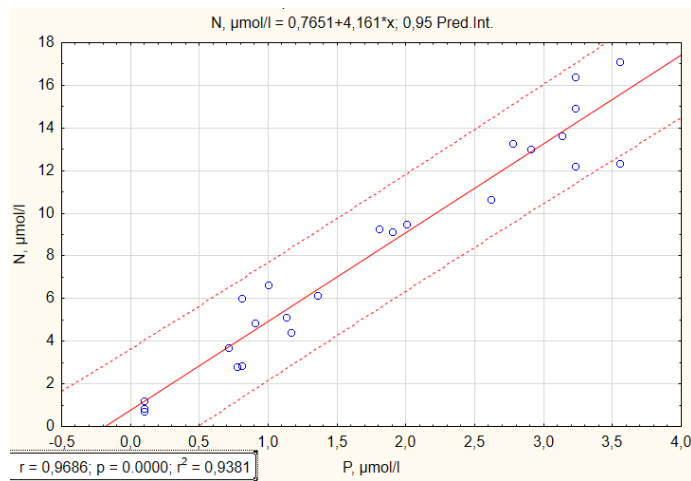


Рисунок 2.2 – N:P соотношение, Восток, август, 1997

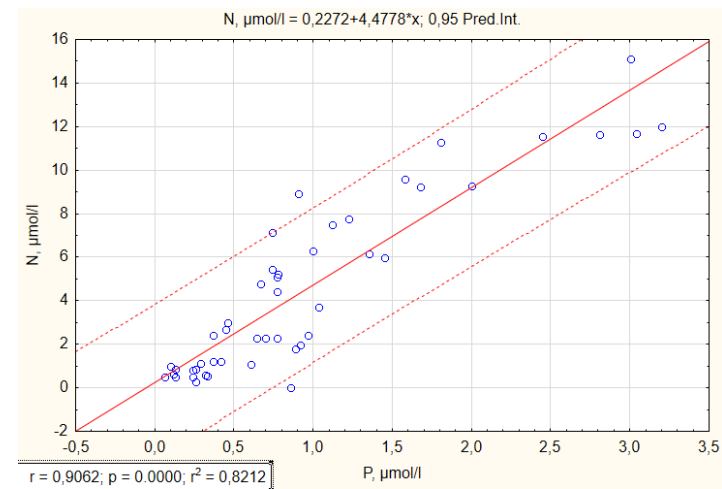


Рисунок 2.3 – N:P соотношение, Запад, август, 1997

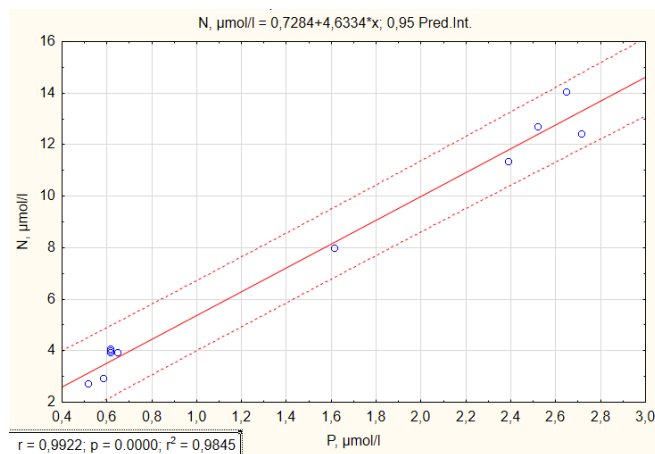


Рисунок 2.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 1997

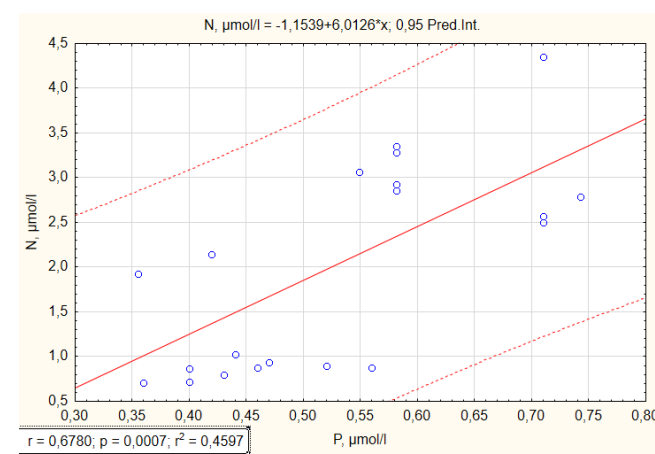


Рисунок 2.5 – N:P соотношение, запад, октябрь 1997

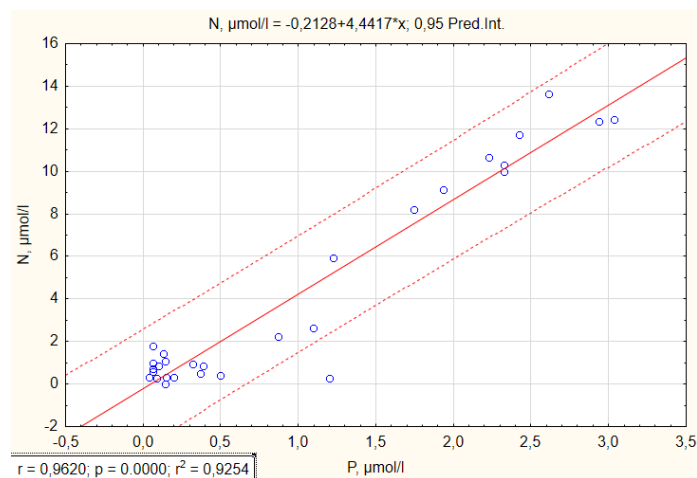


Рисунок 3 – N:P соотношение, восток, июнь, 1998

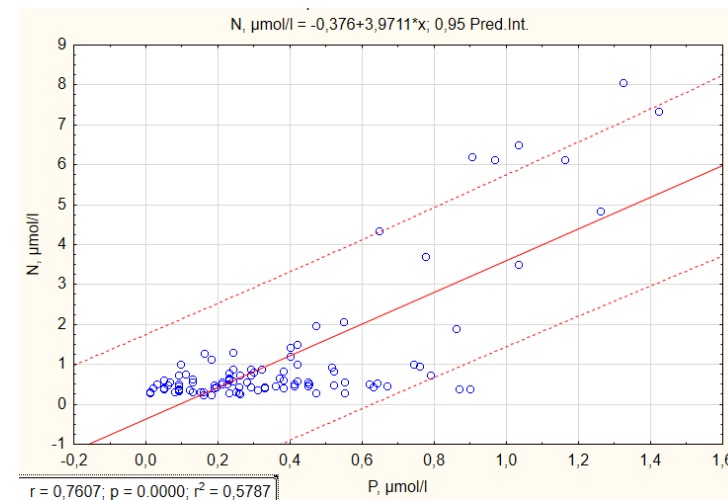


Рисунок 3.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 1998

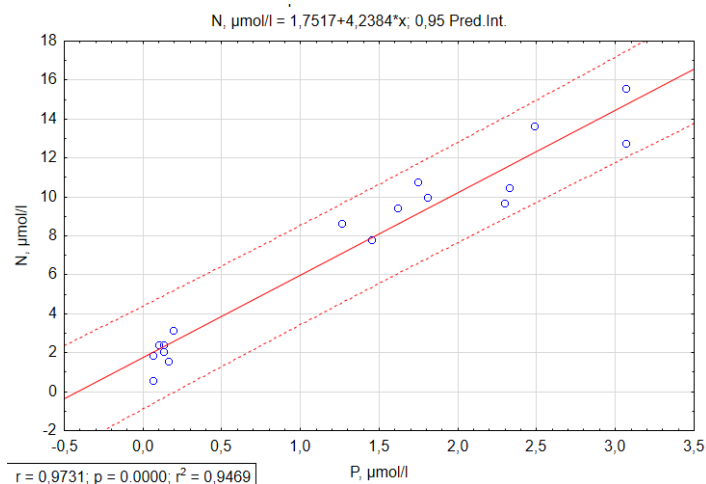


Рисунок 3.2 – N:P соотношение, восток, август, 1998

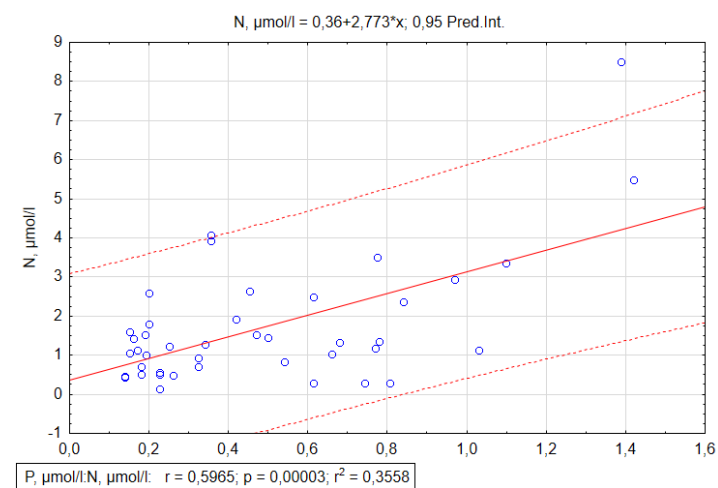


Рисунок 3.3 – N:P соотношение, запад, август, 1998

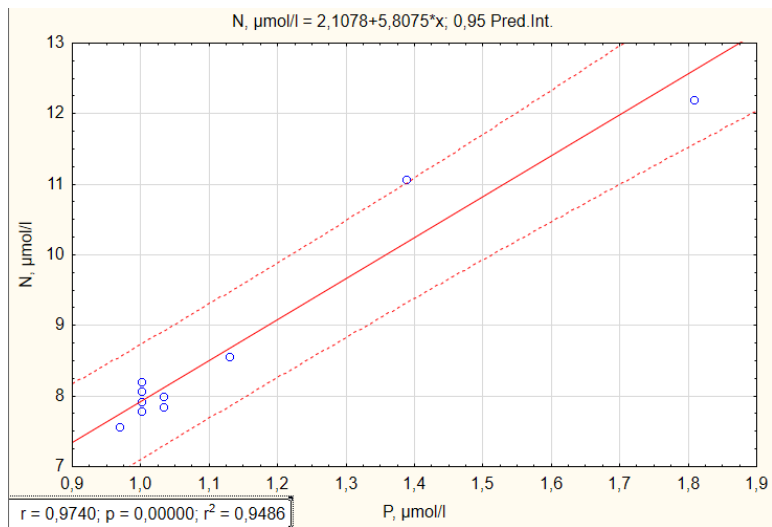


Рисунок 3.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 1998

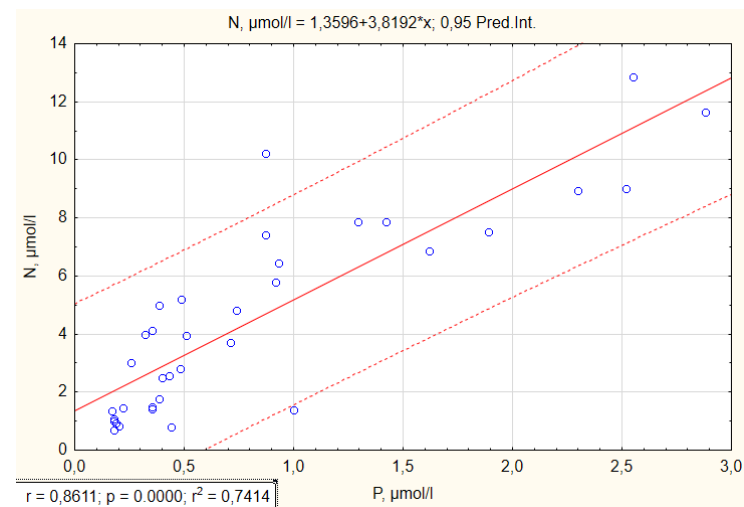


Рисунок 3.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 1998

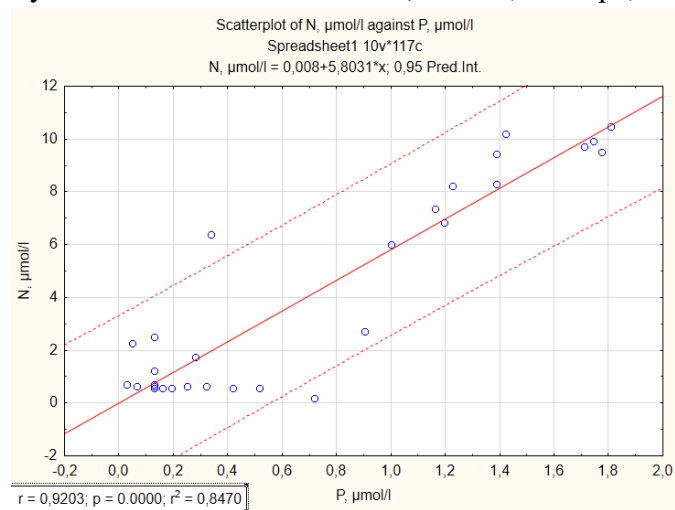


Рисунок 4 – N:P соотношение, восток, июнь, 1999

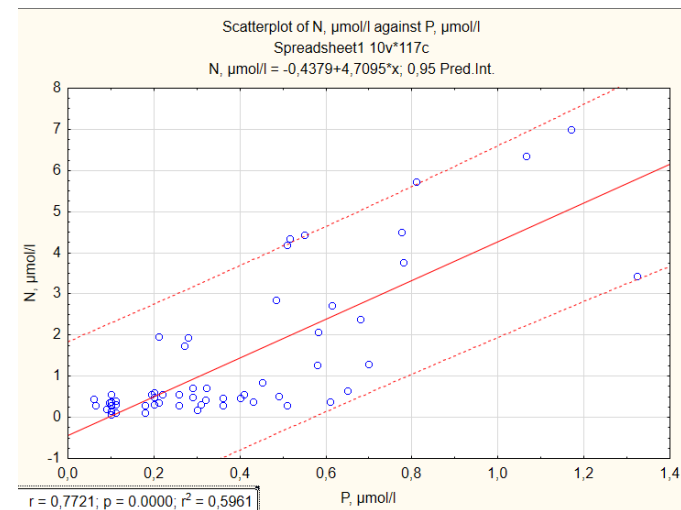


Рисунок 4.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 1999

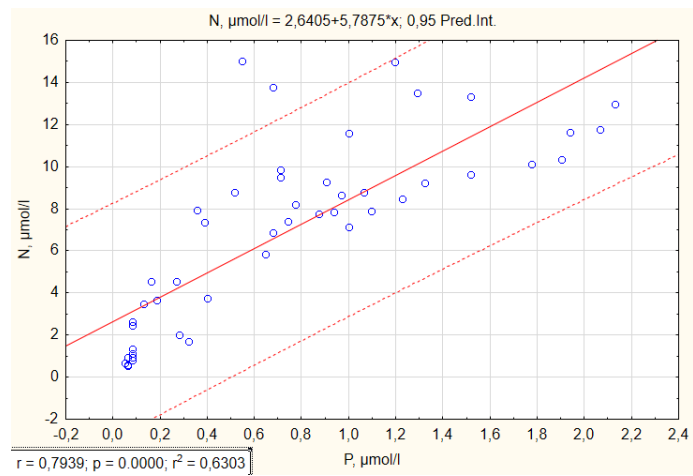


Рисунок 4.2 – N:P соотношение, восток, август, 1999

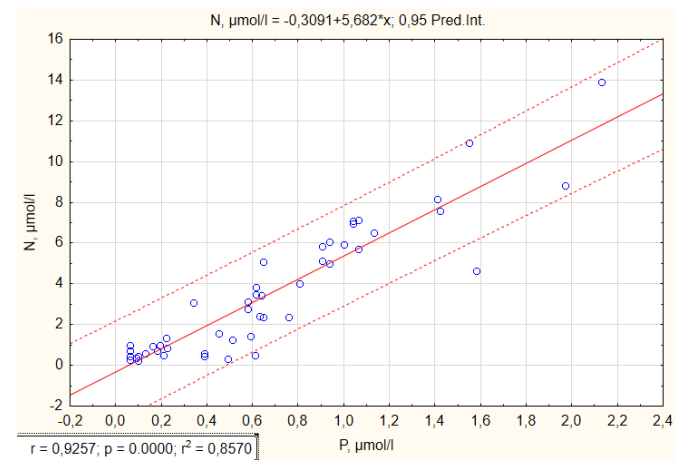


Рисунок 4.3 – N:P соотношение, запад, август, 1999

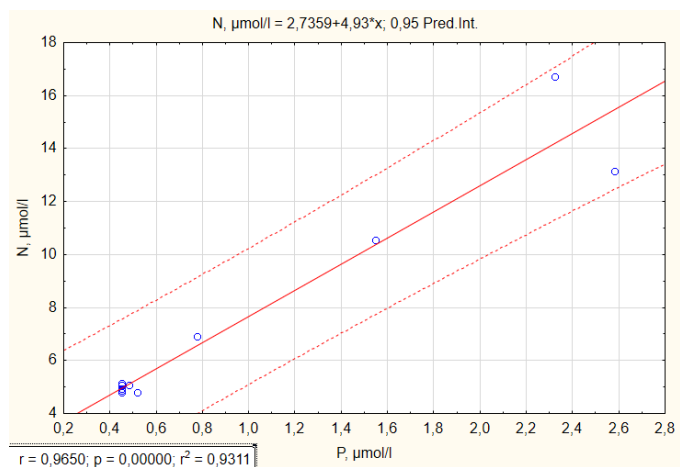


Рисунок 4.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 1999

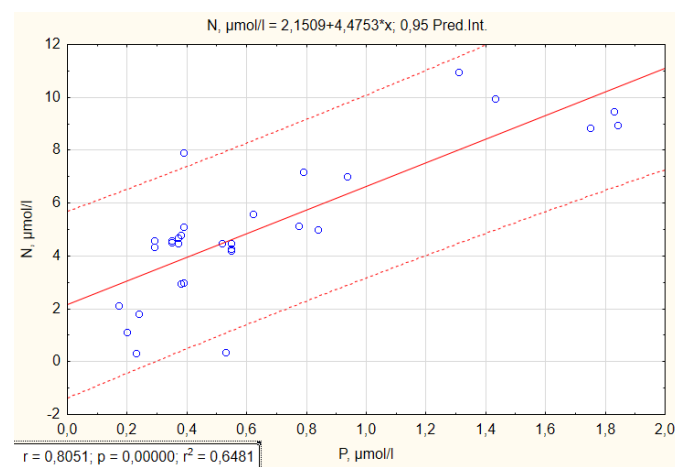


Рисунок 4.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 1999

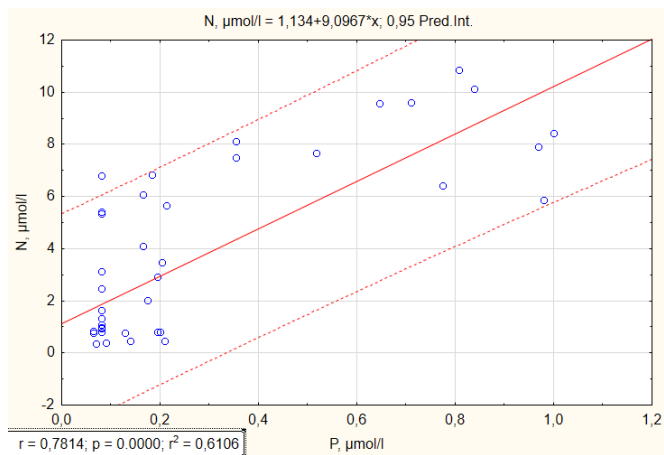


Рисунок 5 – N:P соотношение, восток, июнь, 2000

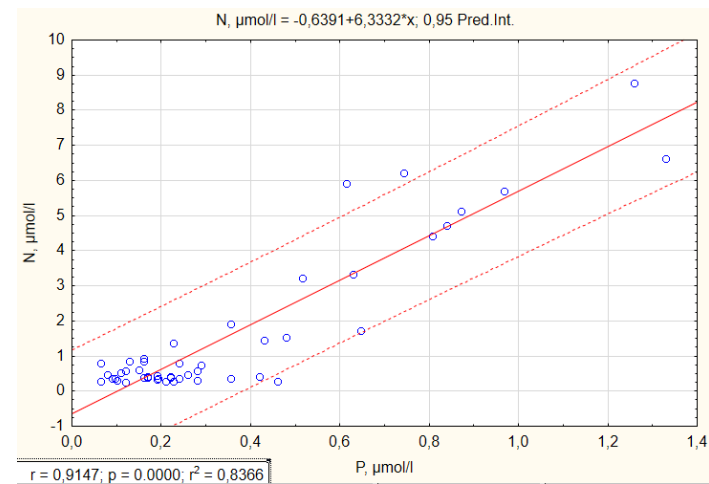


Рисунок 5.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2000

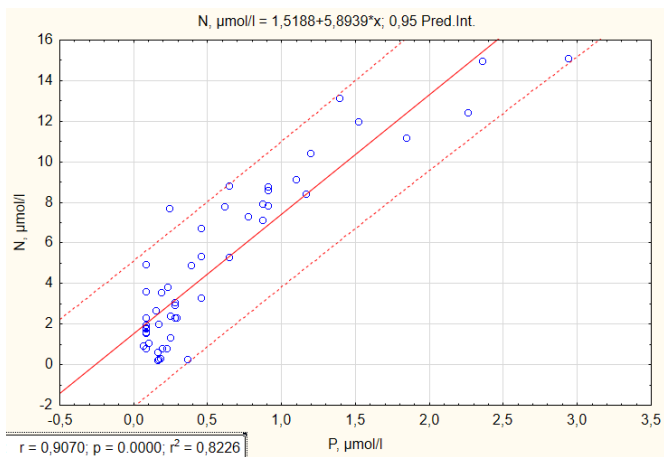


Рисунок 5.2 – N:P соотношение, восток, август, 2000

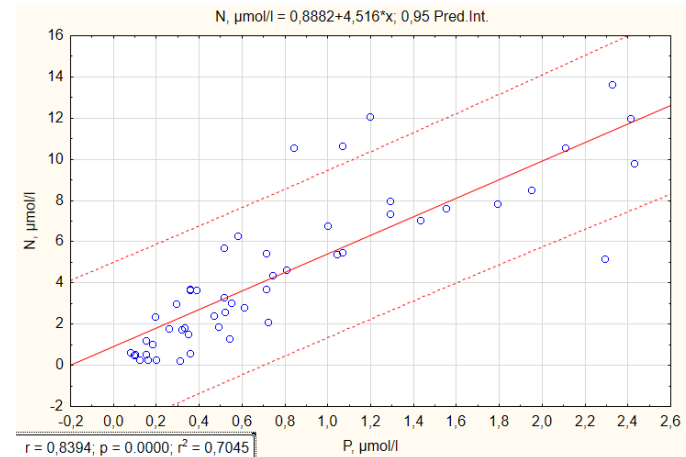


Рисунок 5.3 – N:P соотношение, запад, август, 2000

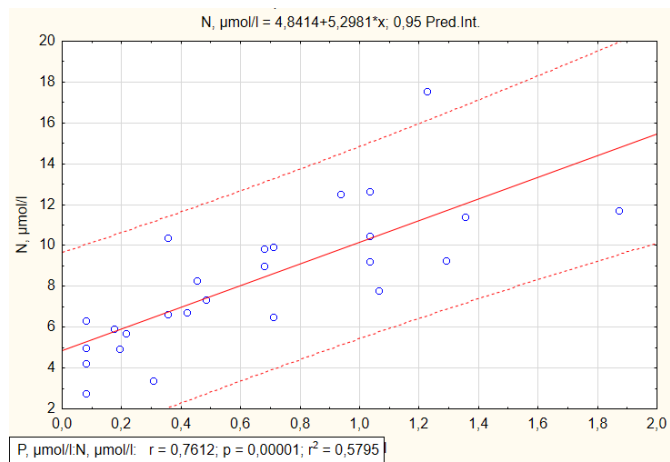


Рисунок 5.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2000

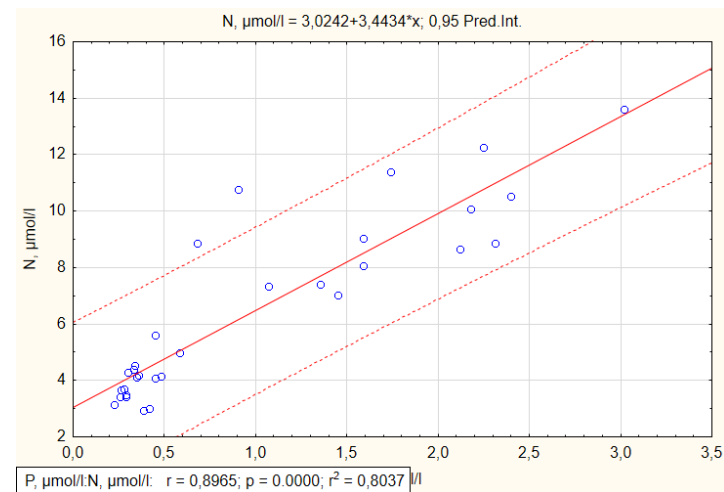


Рисунок 5.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2000

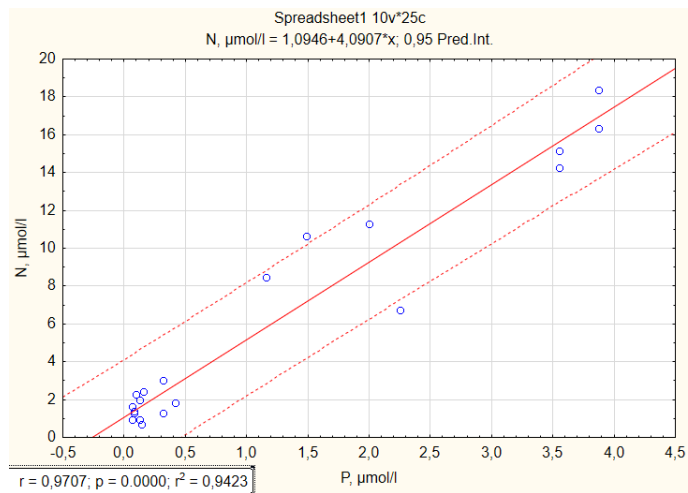


Рисунок 6 – N:P соотношение, восток, июнь, 2001

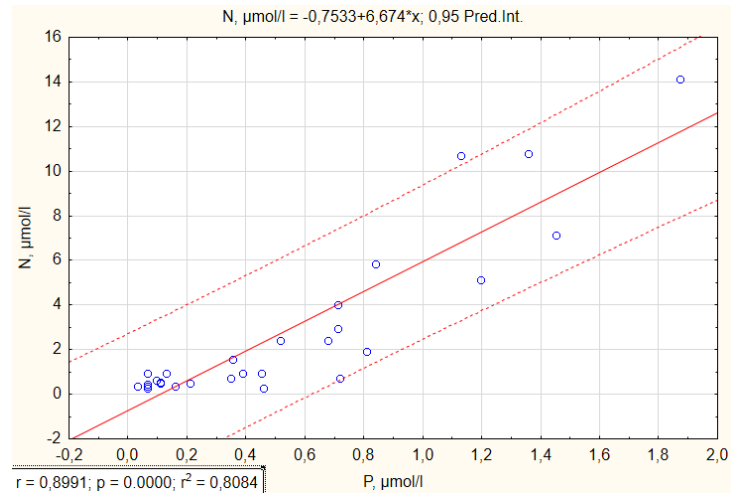


Рисунок 6.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2001

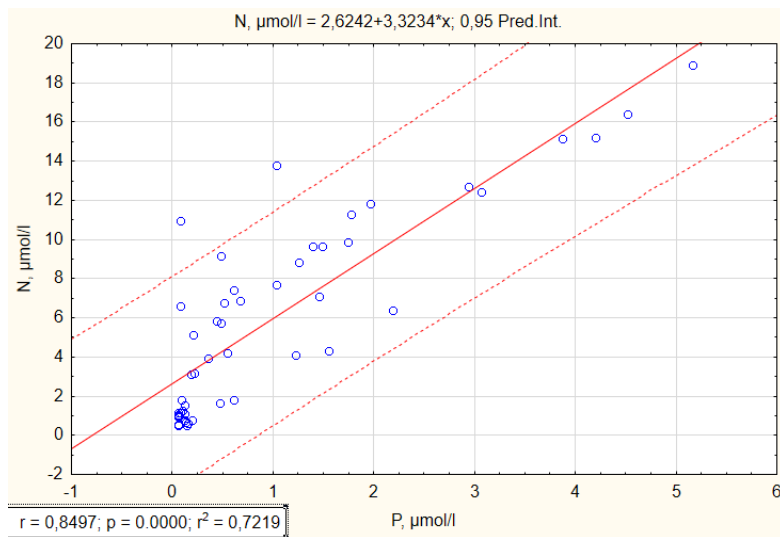


Рисунок 6.2 – N:P соотношение, восток, август, 2001

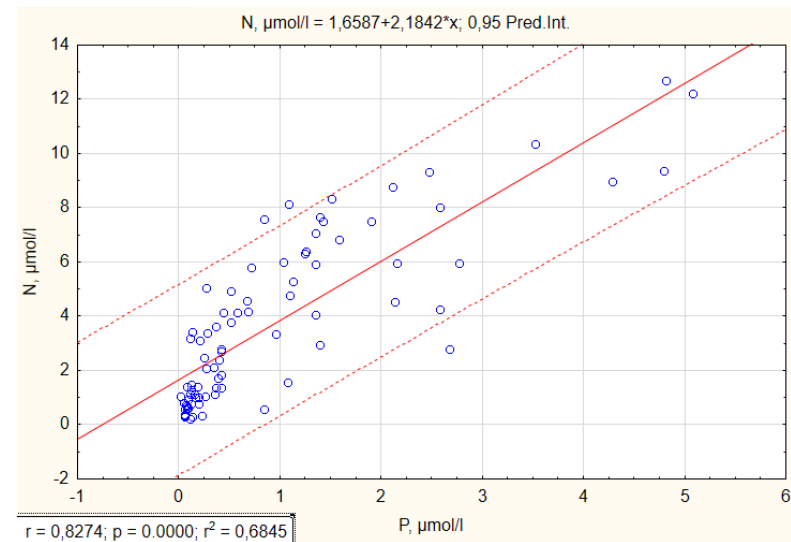


Рисунок 6.3 – N:P соотношение, запад, август, 2001

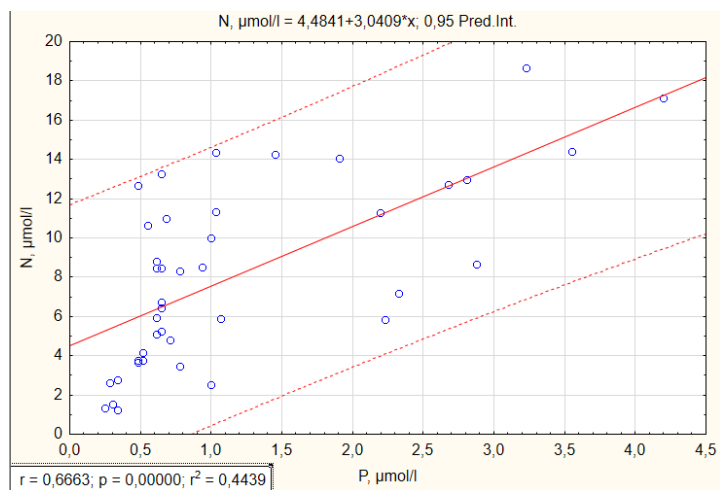


Рисунок 6.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2001

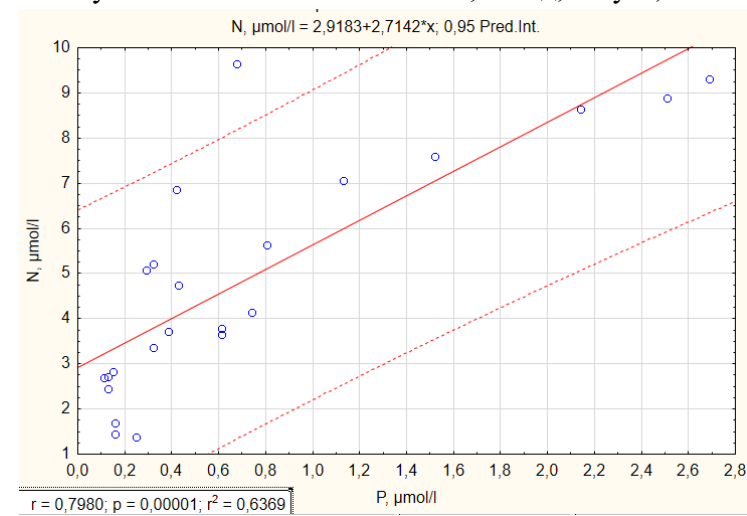


Рисунок 6.5 – N:P соотношение, запад, октябрь 2001

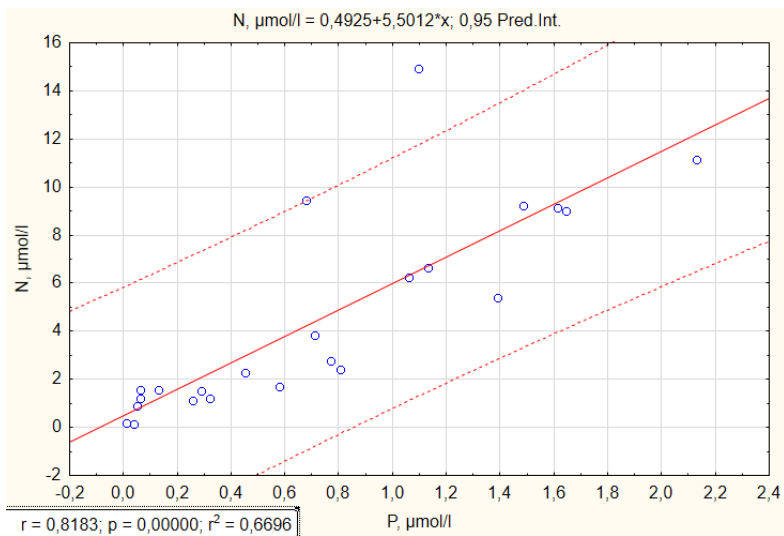


Рисунок 7 – N:P соотношение, восток, июнь, 2002

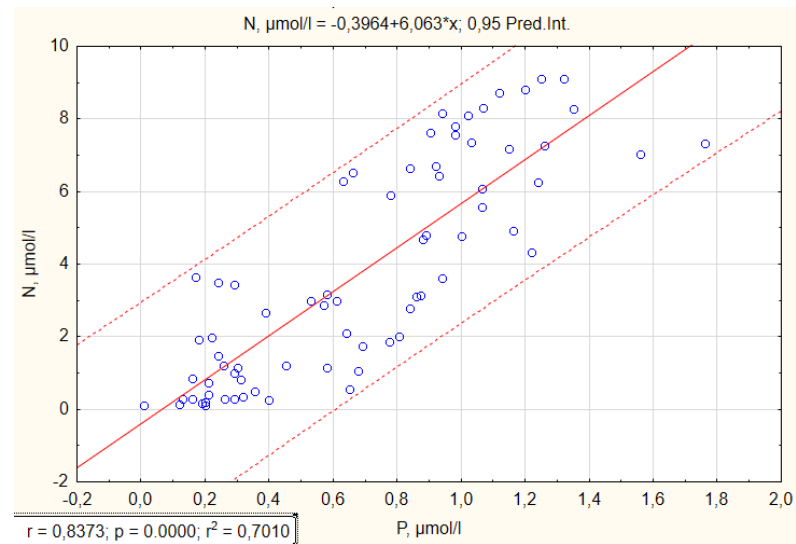


Рисунок 7.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2002

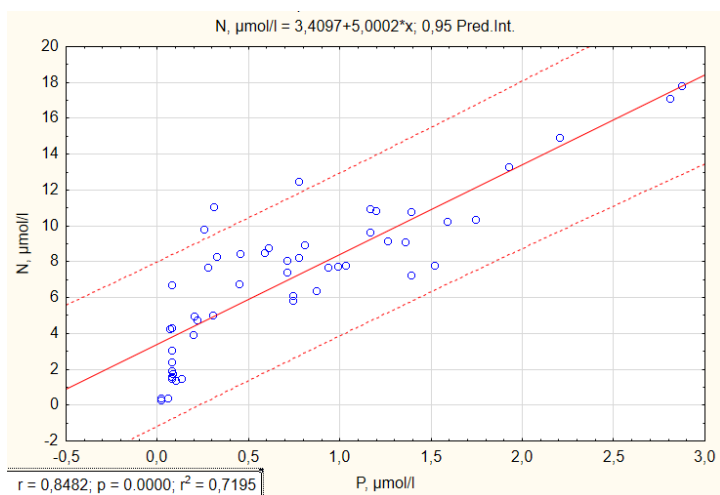


Рисунок 7.2 – N:P соотношение, восток, август, 2002

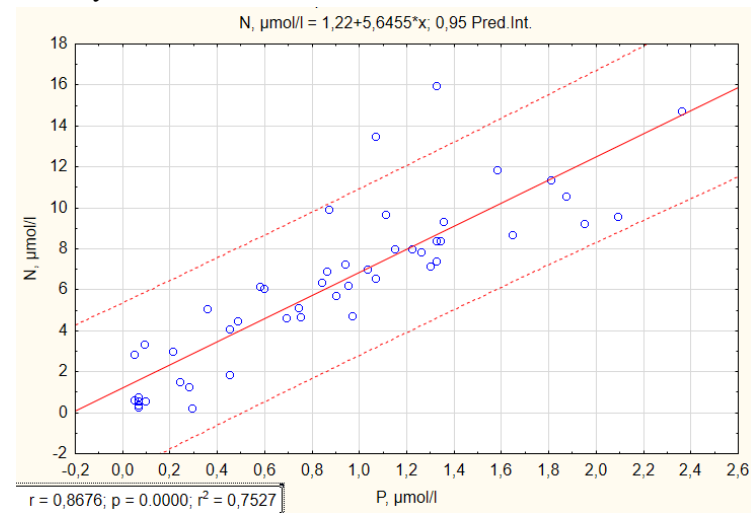


Рисунок 7.3 – N:P соотношение, запад, август, 2002

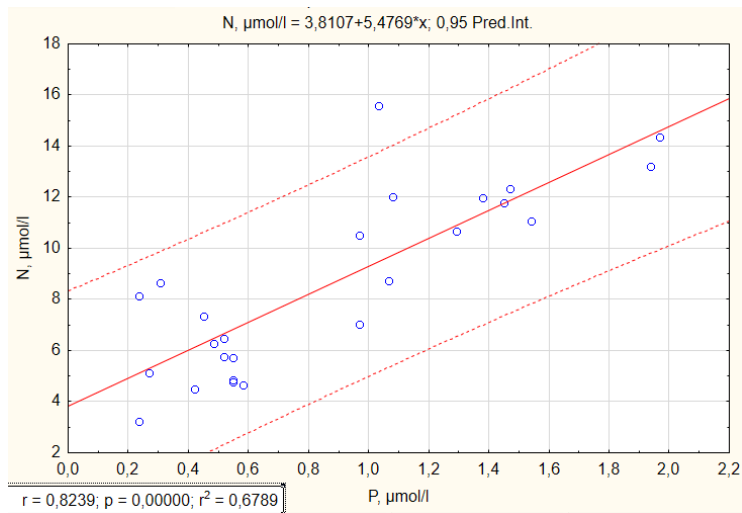


Рисунок 7.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2002

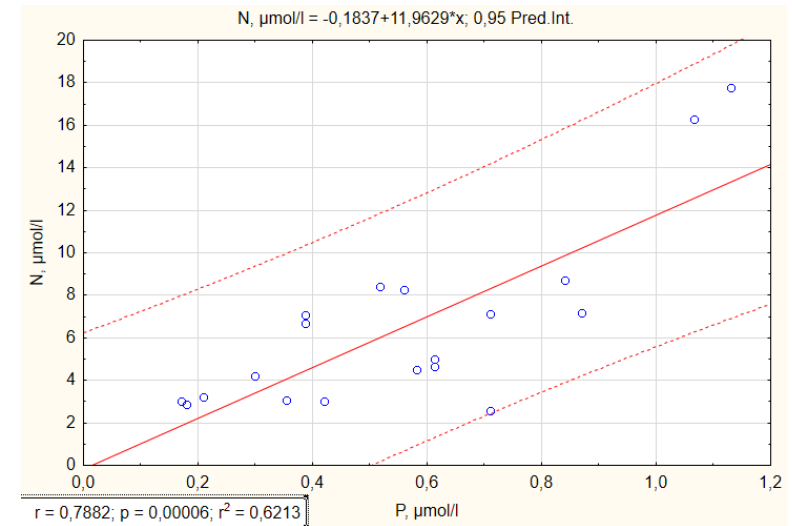


Рисунок 7.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2002

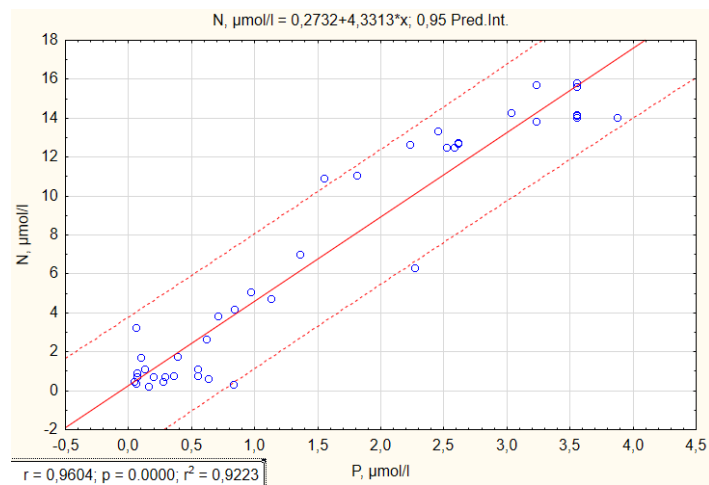


Рисунок 8 – N:P соотношение, восток, июнь, 2003

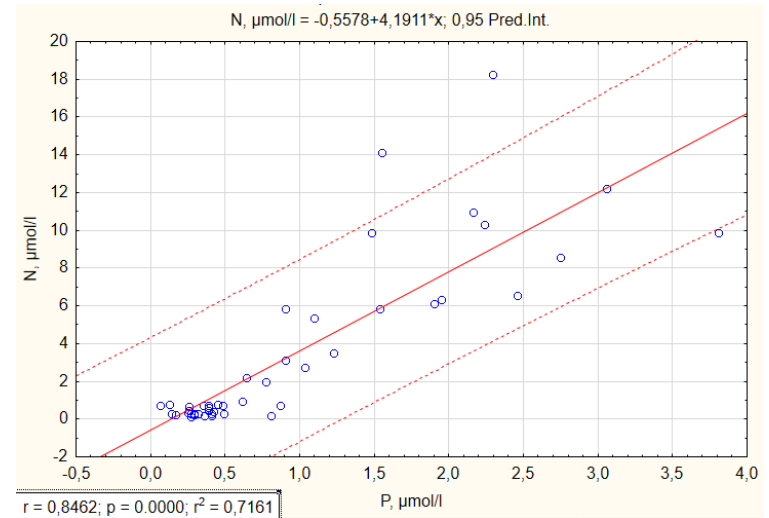


Рисунок 8.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2003

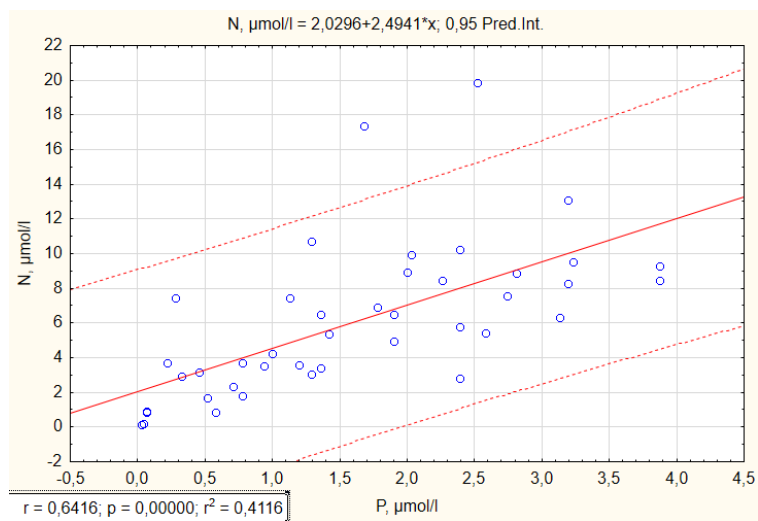


Рисунок 8.2 – N:P соотношение, восток, август, 2003

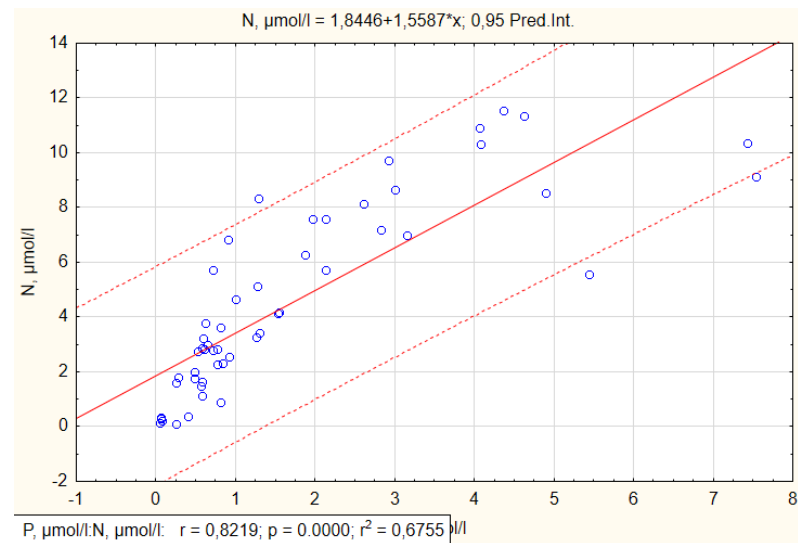


Рисунок 8.3 - N:P соотношение, запад, август, 2003

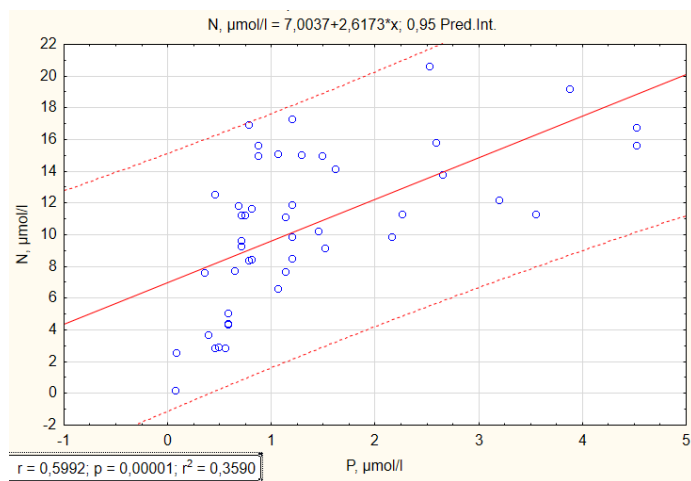


Рисунок 8.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2003

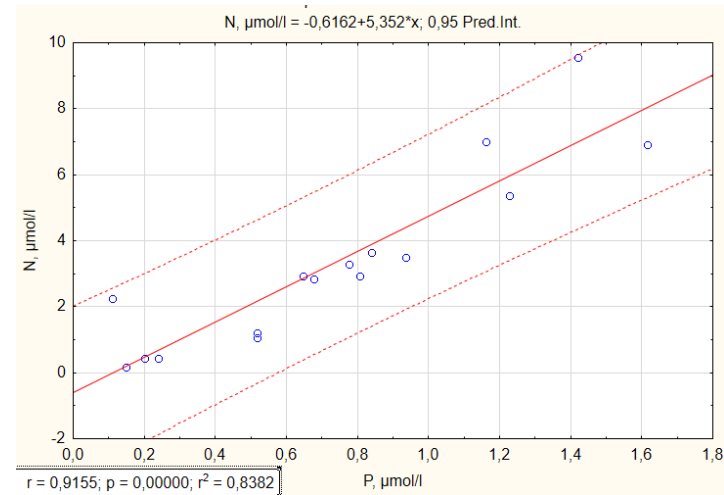


Рисунок 8.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2003

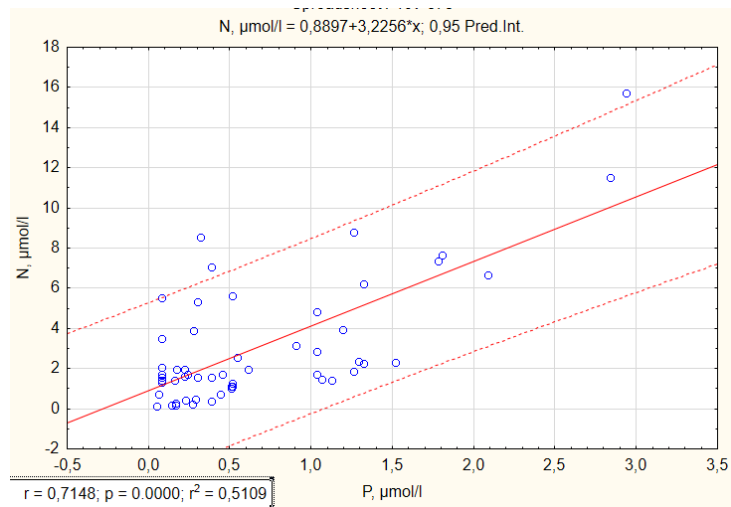


Рисунок 9 – N:P соотношение, восток, июнь, 2004

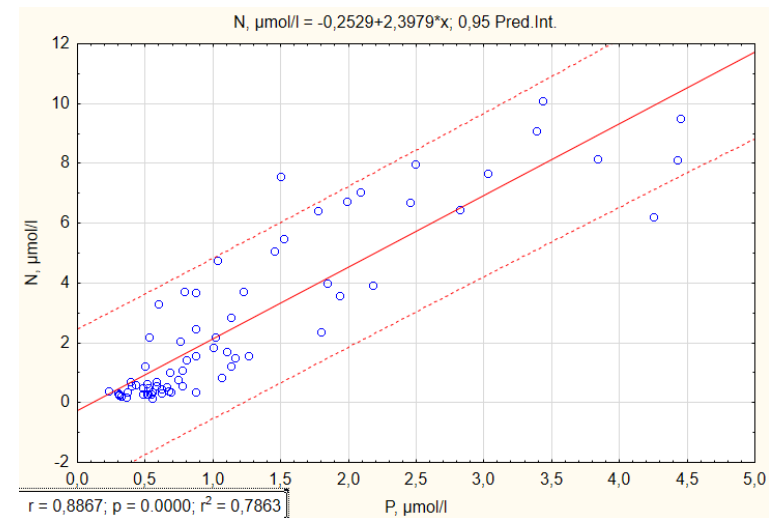


Рисунок 9.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2004

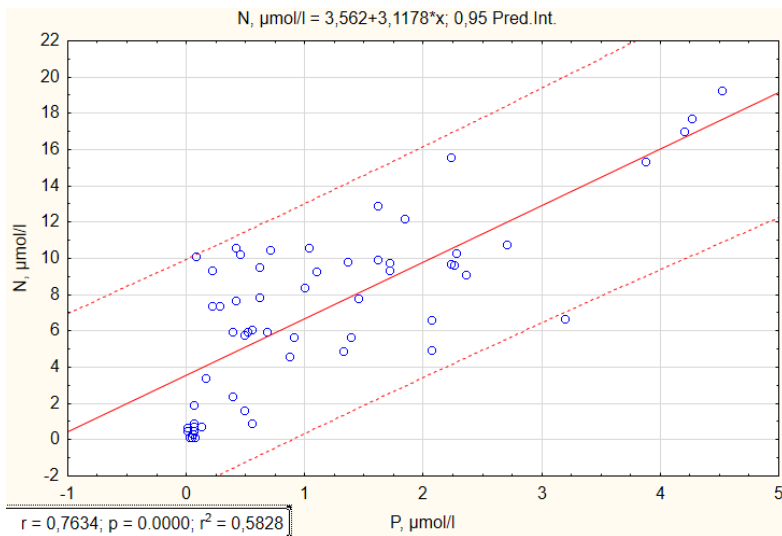


Рисунок 9.2 – N:P соотношение, восток, август, 2004

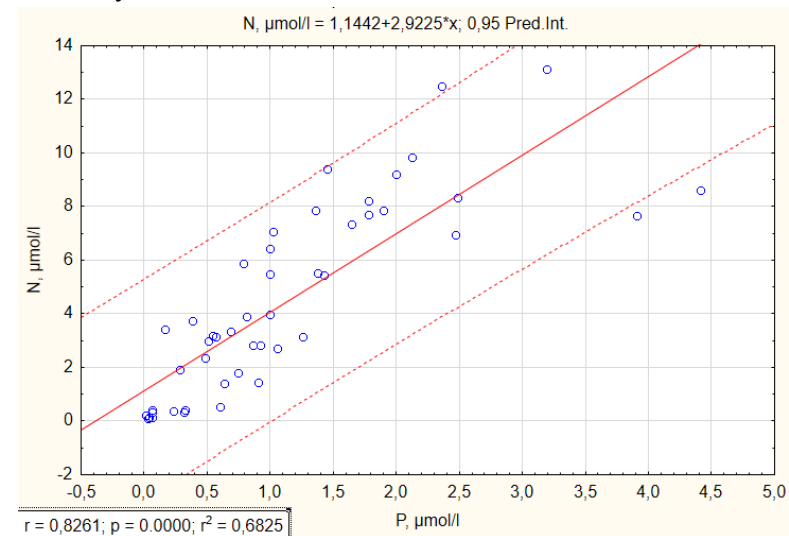


Рисунок 9.3 – N:P соотношение, запад, август, 2004

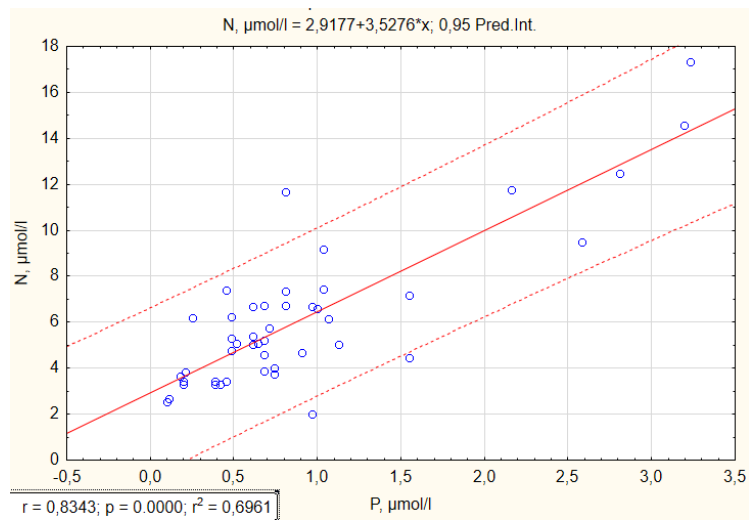


Рисунок 9.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2004

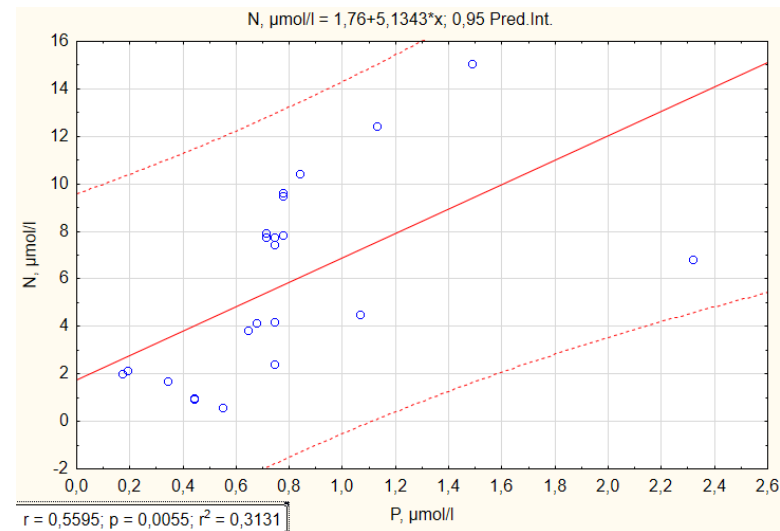


Рисунок 9.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2004

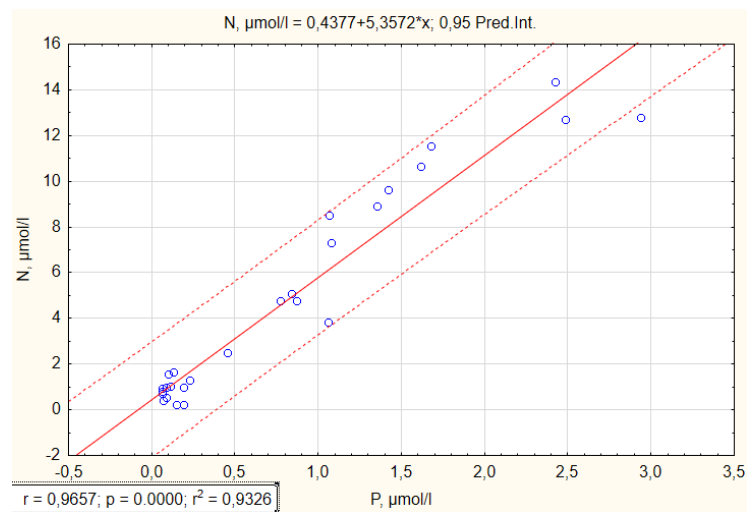


Рисунок 10 – N:P соотношение, восток. Июнь, 2005

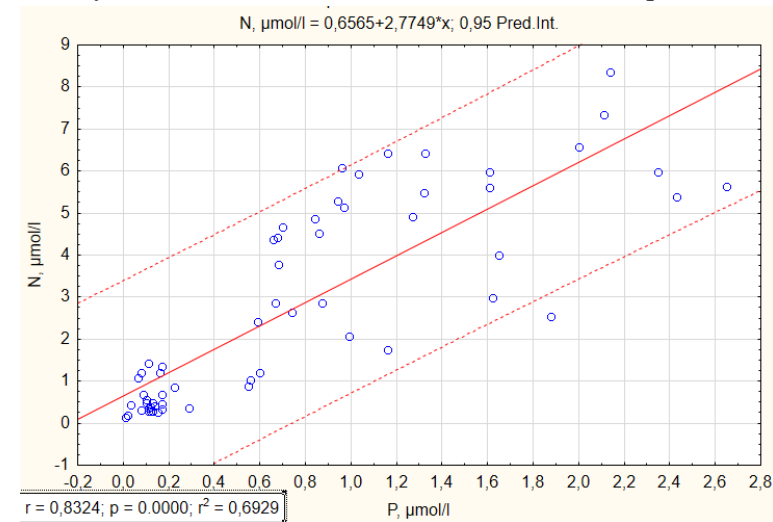


Рисунок 10.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2005

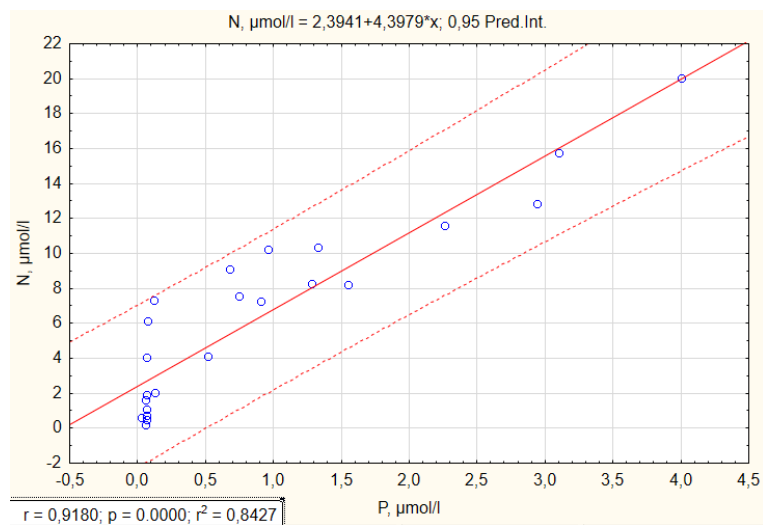


Рисунок 10.2 – N:P соотношение, восток, август, 2005

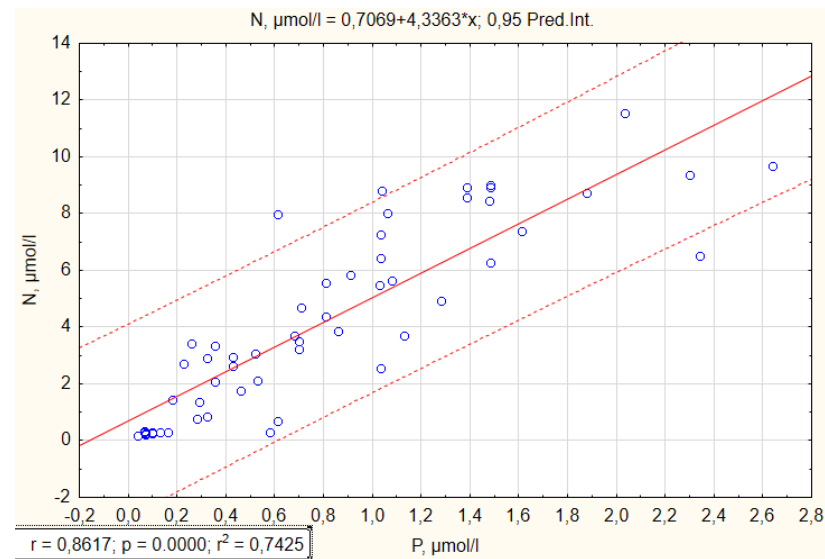


Рисунок 10.3 – N:P соотношение, запад, август, 2005

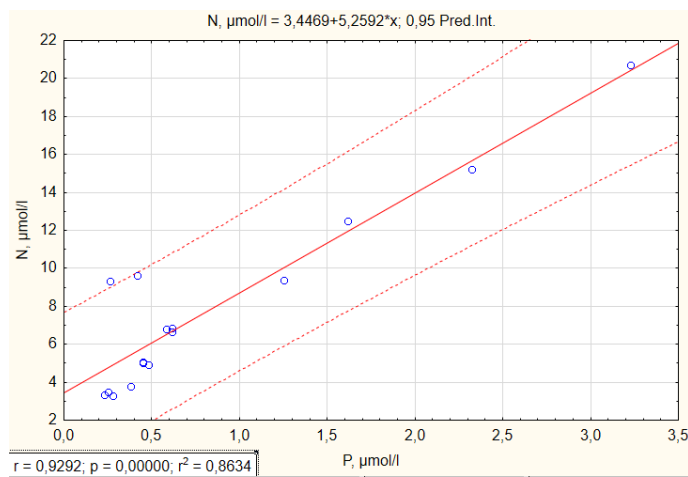


Рисунок 10.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2005

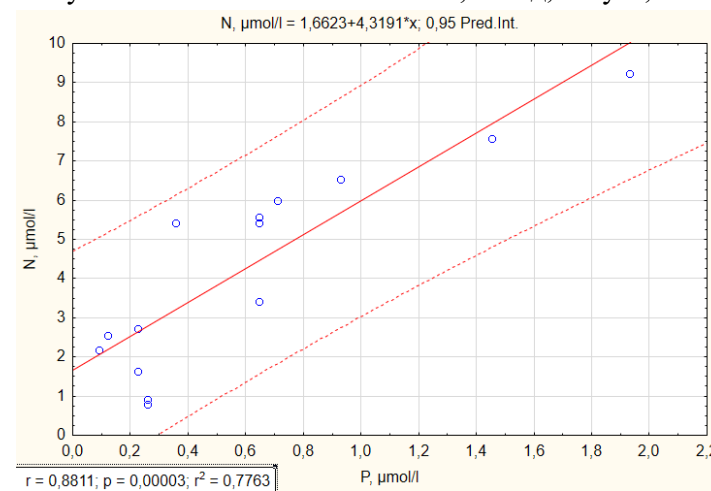


Рисунок 10.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2005

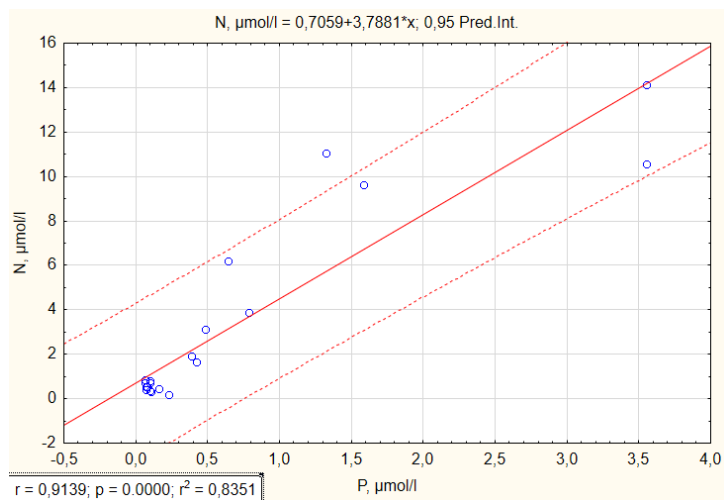


Рисунок 11 – N:P соотношение, восток. Июнь, 2006

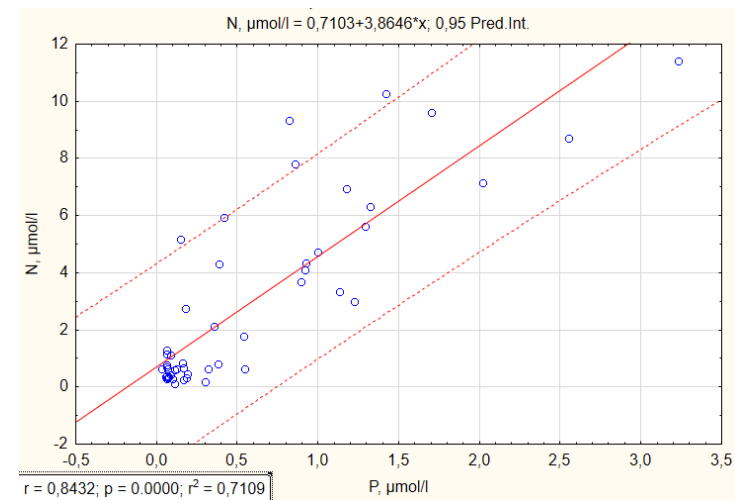


Рисунок 11.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2006

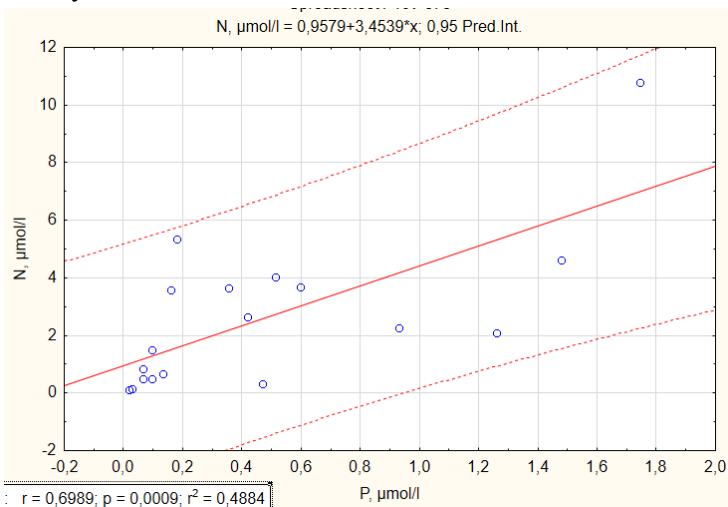


Рисунок 11.2 – N:P соотношение, восток, август, 2006

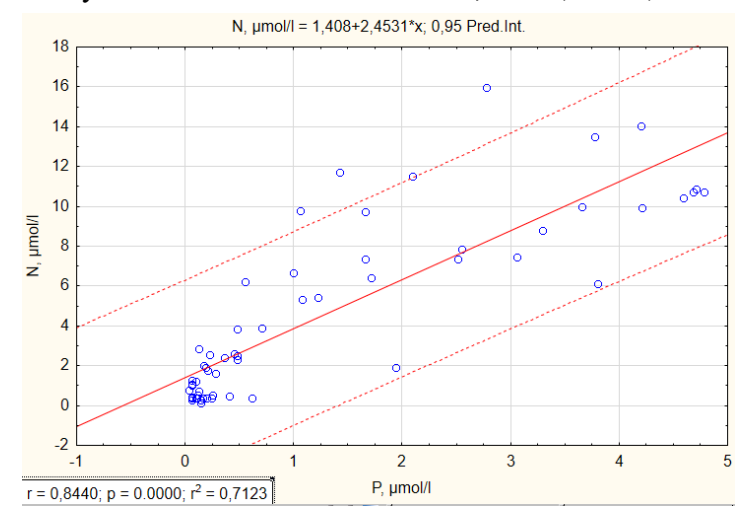


Рисунок 11.3 – N:P соотношение, запад, август, 2006

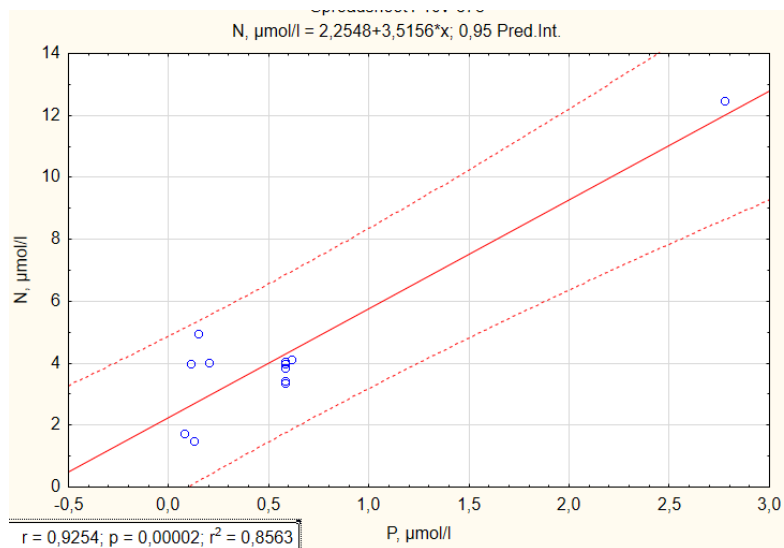


Рисунок 11.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2006

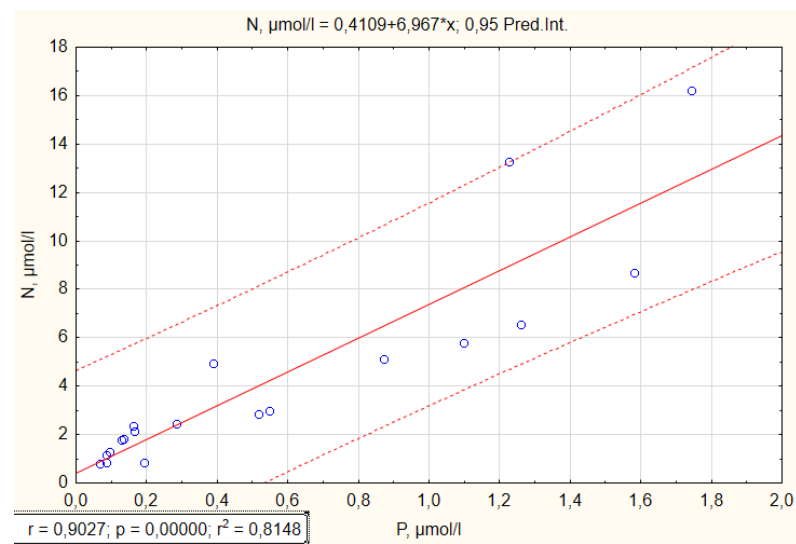


Рисунок 11.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2006

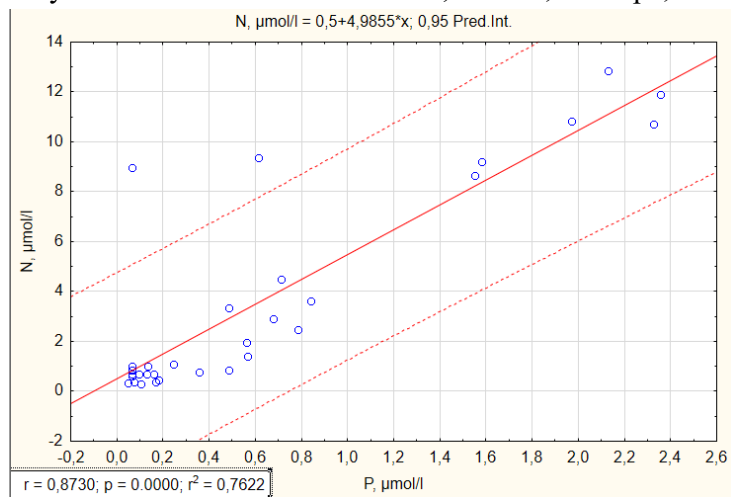


Рисунок 12 – N:P соотношение, восток, июнь, 2007

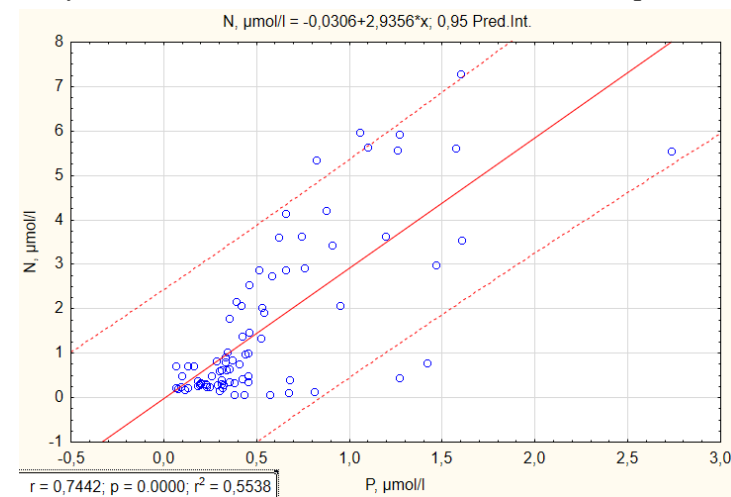


Рисунок 12.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2007

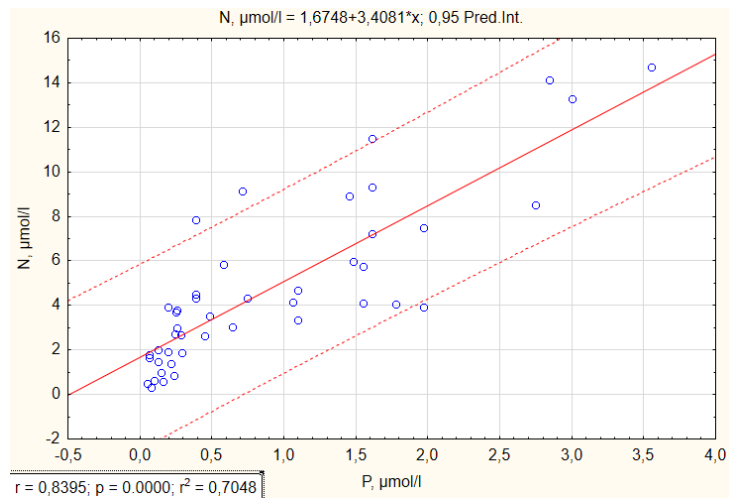


Рисунок 12.2 – N:P соотношение, восток, август, 2007

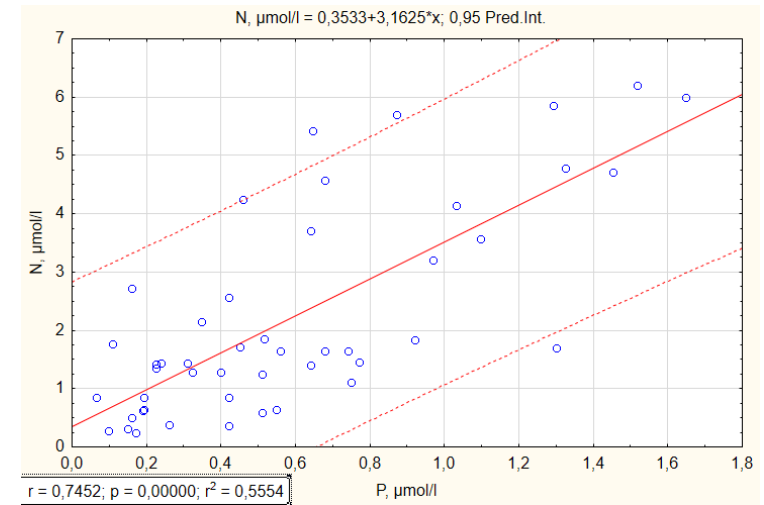


Рисунок 12.3 – N:P соотношение, запад, август, 2007

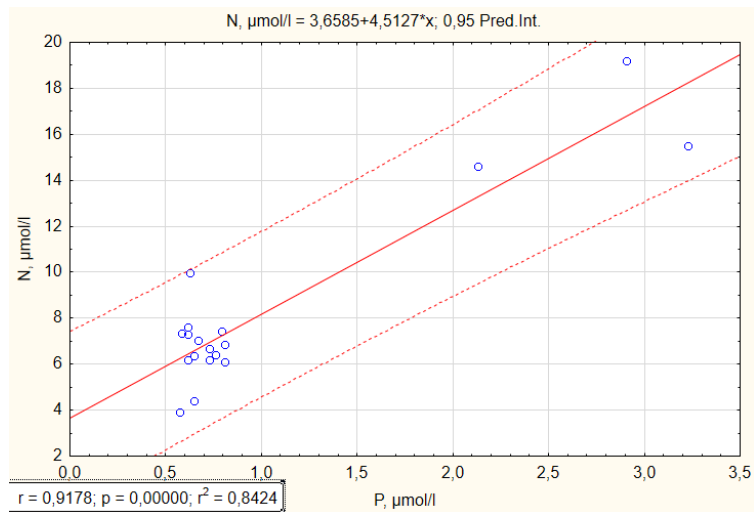


Рисунок 12.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2007

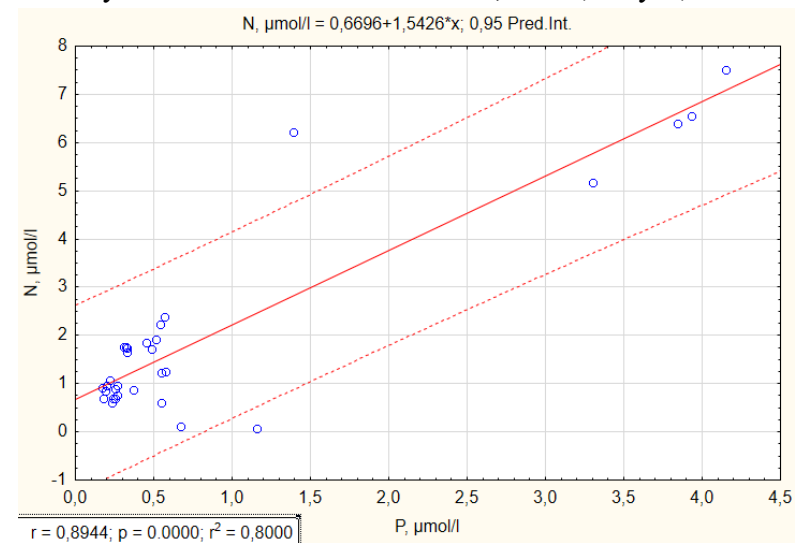


Рисунок 12.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2007

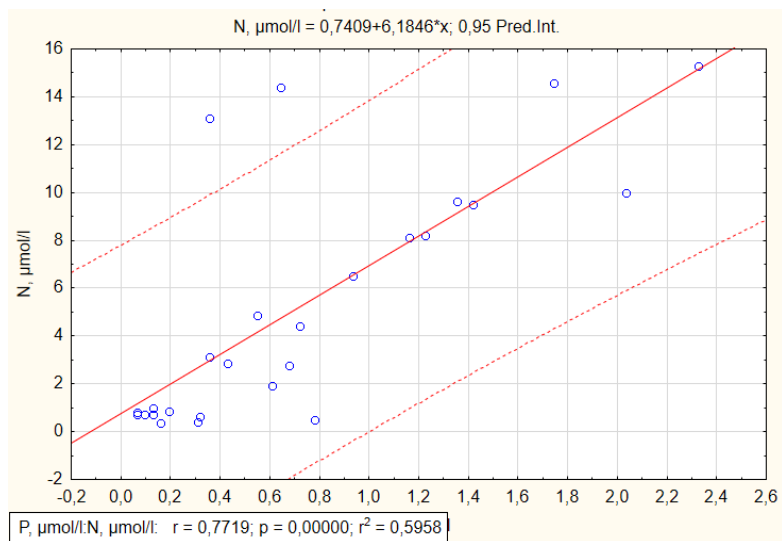


Рисунок 13 – N:P соотношение, восток, июнь, 2008

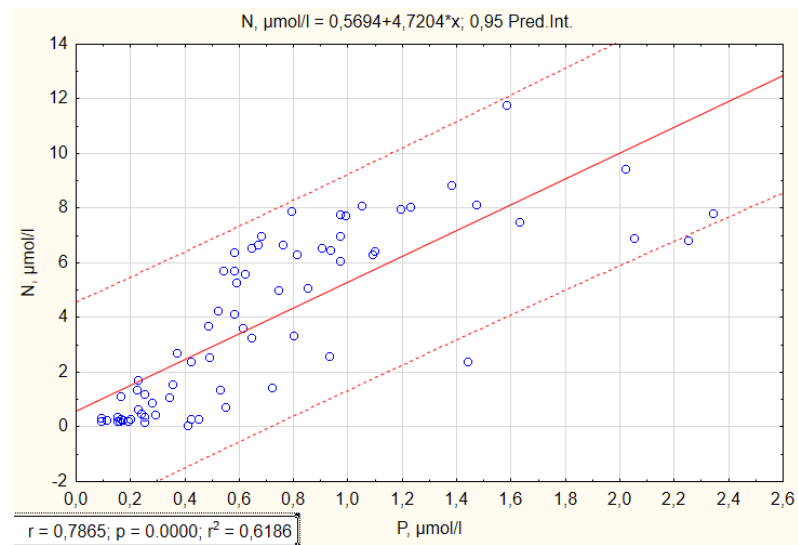


Рисунок 13.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2008

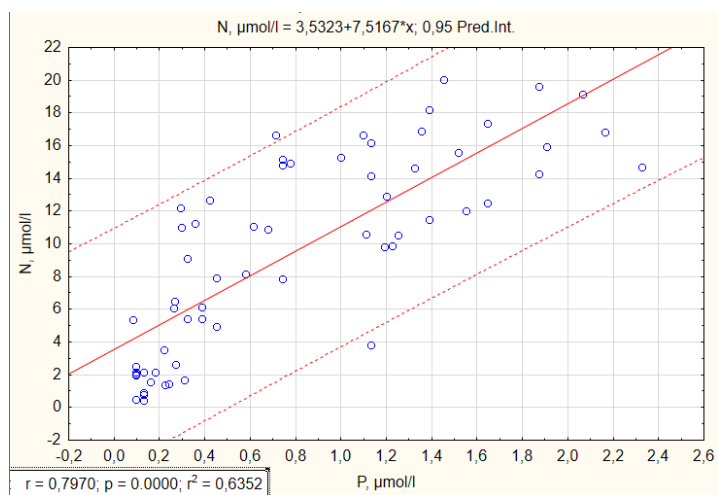


Рисунок 13.2 – N:P соотношение, восток, август, 2008

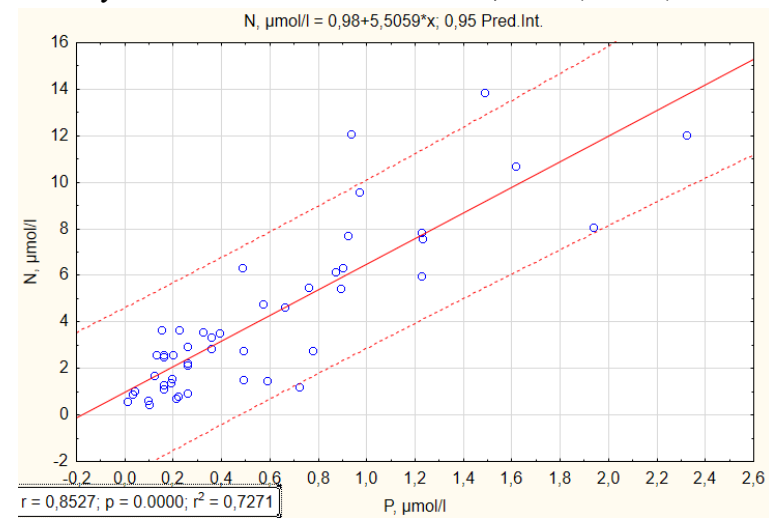


Рисунок 13.3 – N:P соотношение, запад, август, 2008

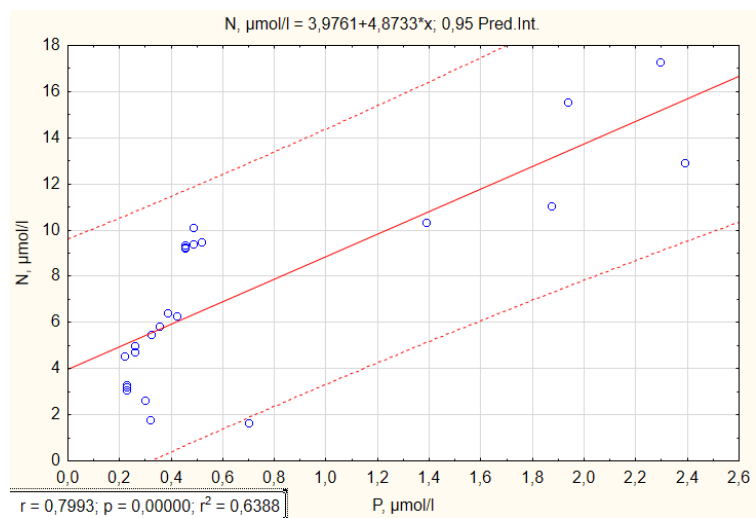


Рисунок 13.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2008

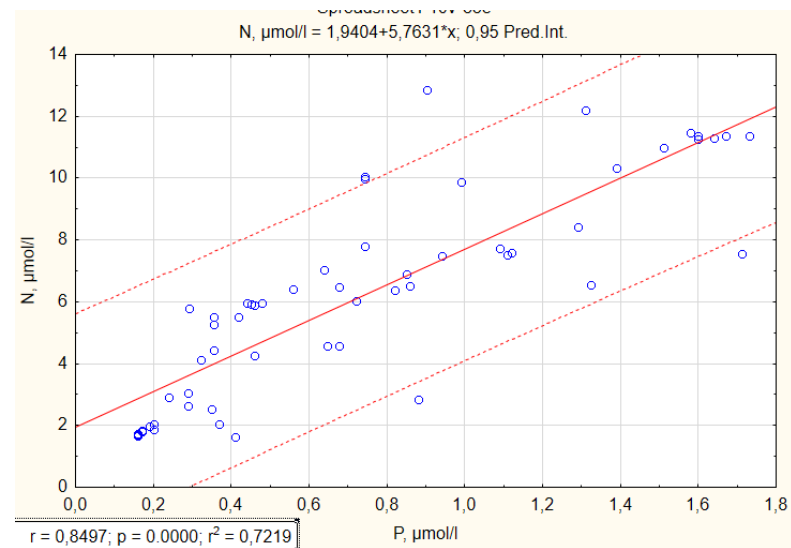


Рисунок 13.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2008

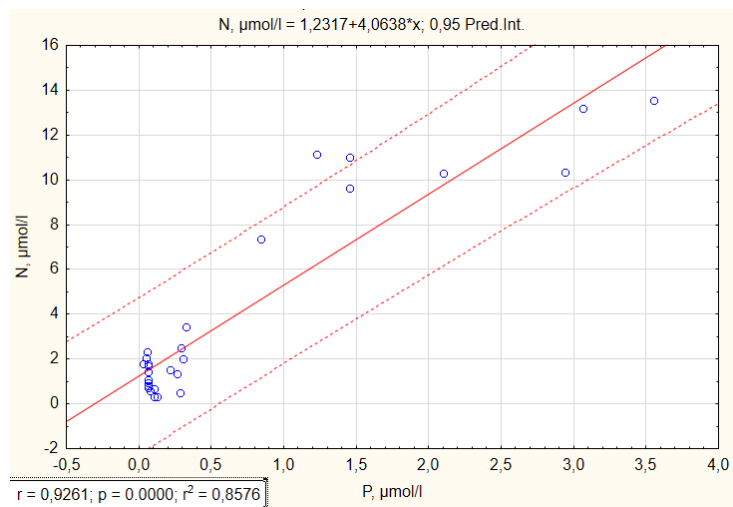


Рисунок 14 – N:P соотношение, восток, июнь, 2009

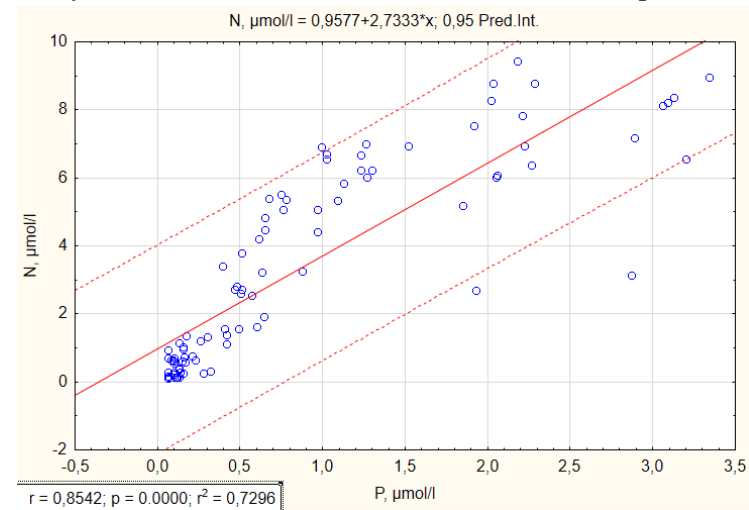


Рисунок 14.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2009

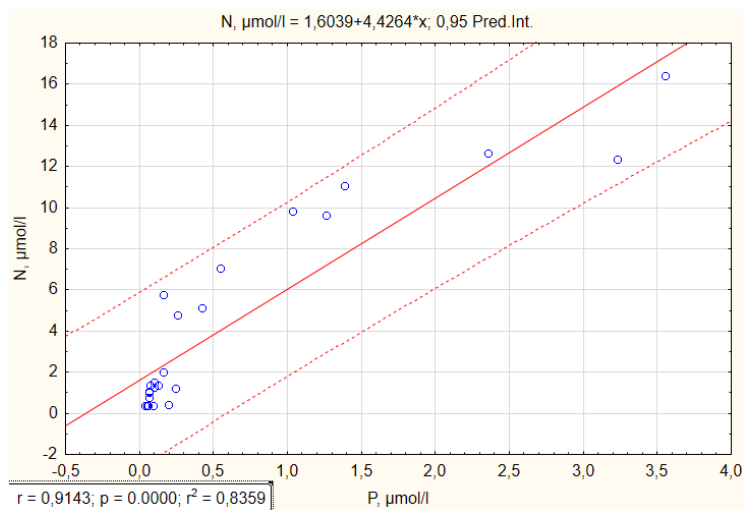


Рисунок 14.2 – N:P соотношение, восток, август, 2009

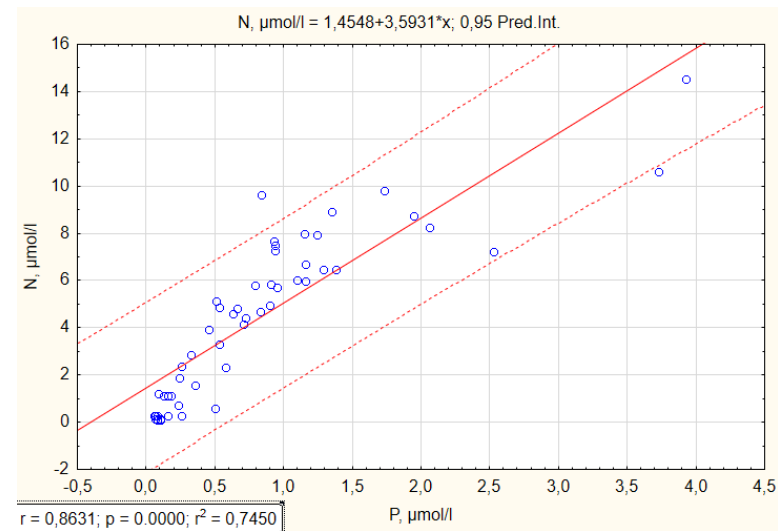


Рисунок 14.3 – N:P соотношение, запад, август, 2009

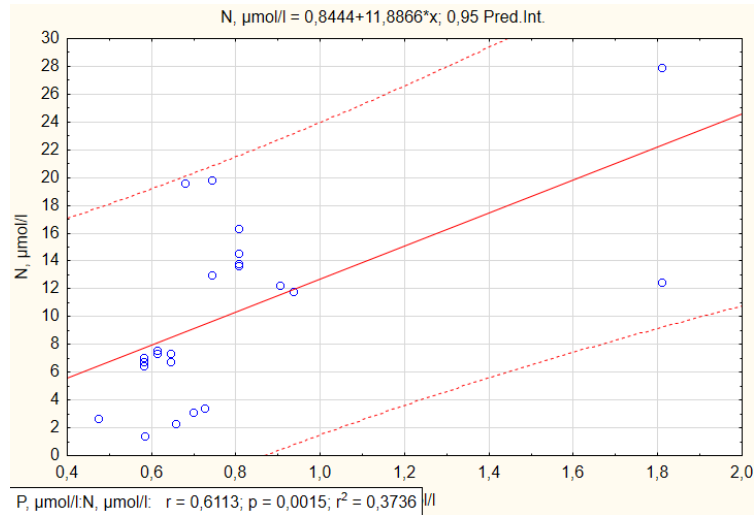


Рисунок 14.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2009

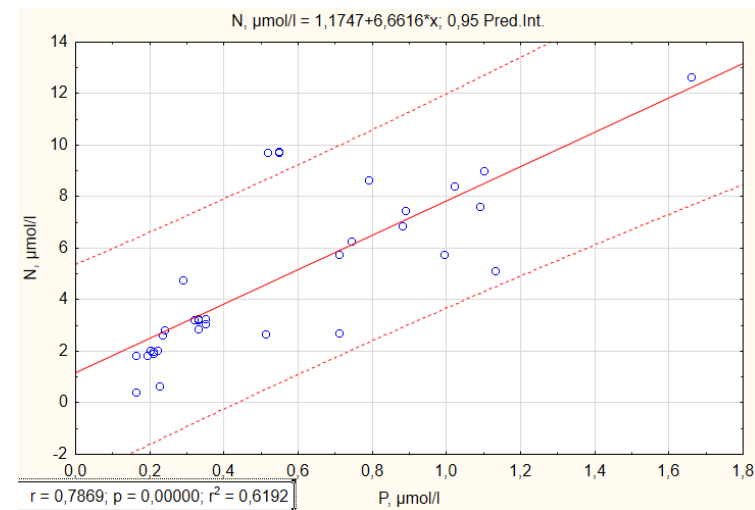


Рисунок 14.5 - N:P соотношение, запад, октябрь, 2009

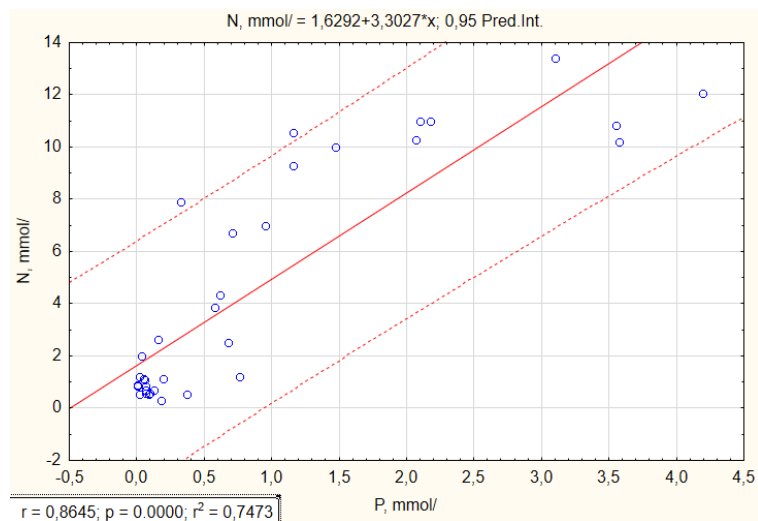


Рисунок 15 – N:P соотношение, восток, июнь, 2010

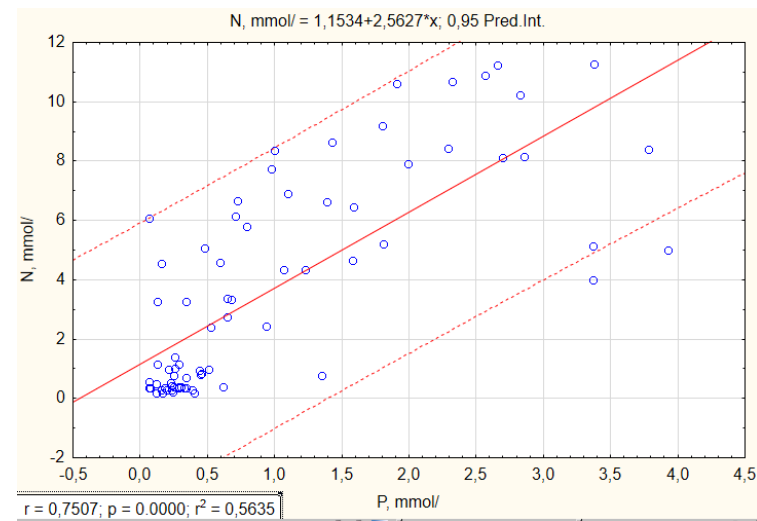


Рисунок 15.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2010

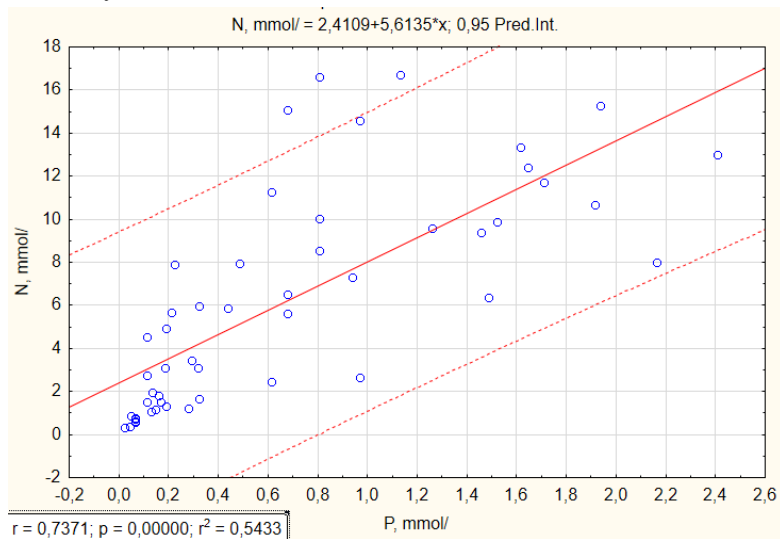


Рисунок 15.2 – N:P соотношение, восток, август, 2010

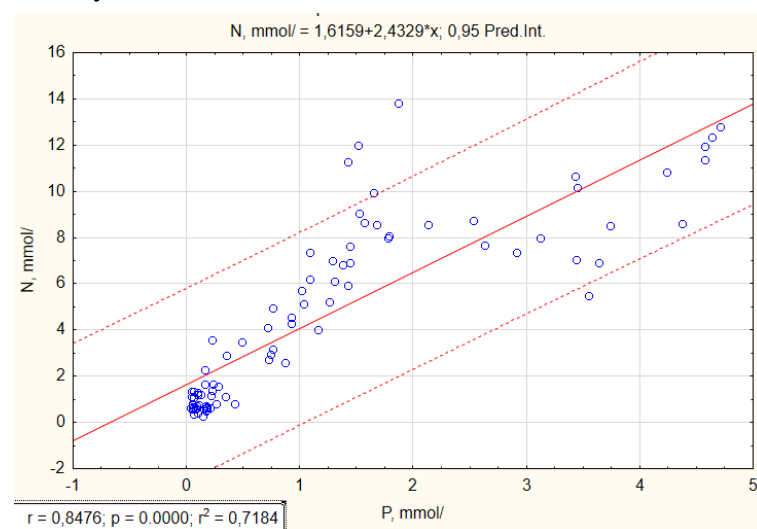


Рисунок 15.3 – N:P соотношение, запад, август, 2010

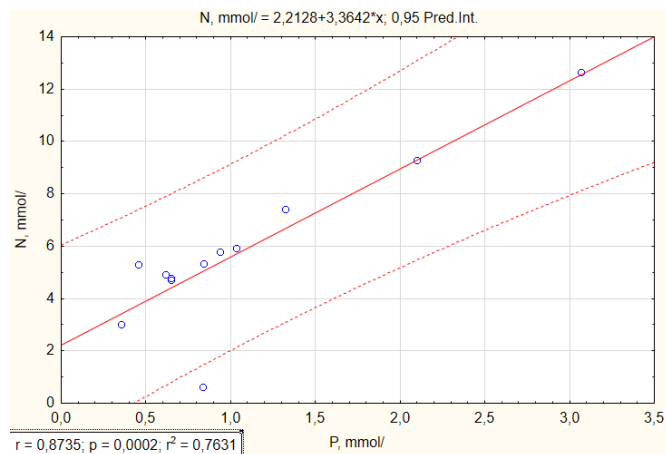


Рисунок 15.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2010

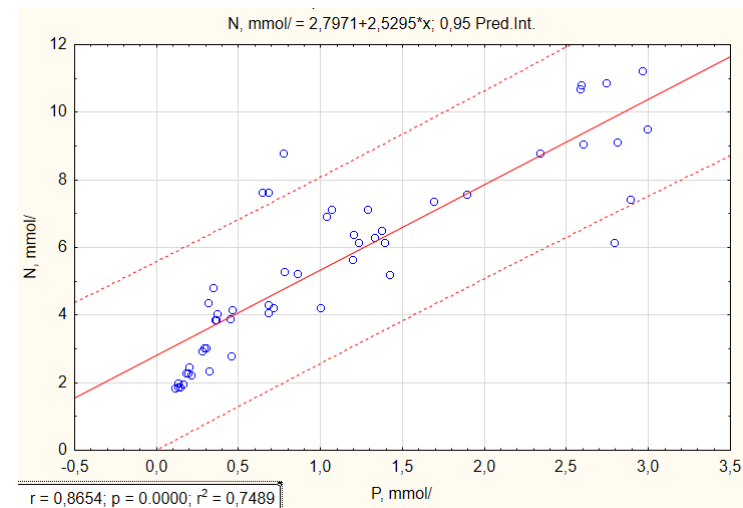


Рисунок 15.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2010

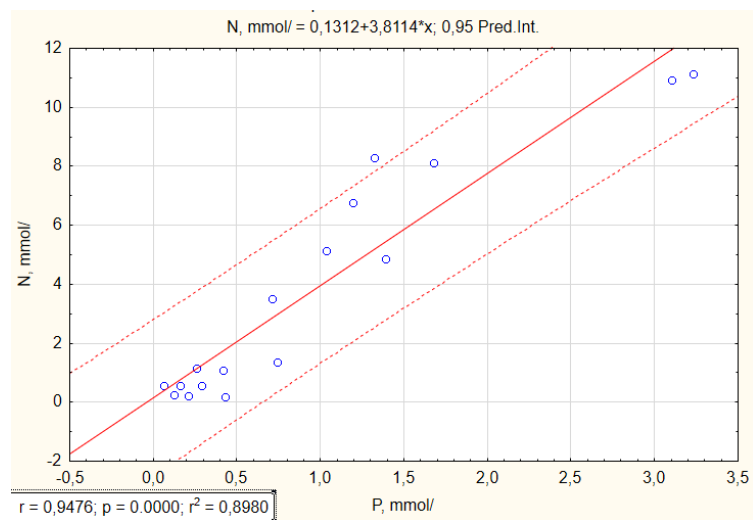


Рисунок 16 – N:P соотношение, восток, июнь, 2011

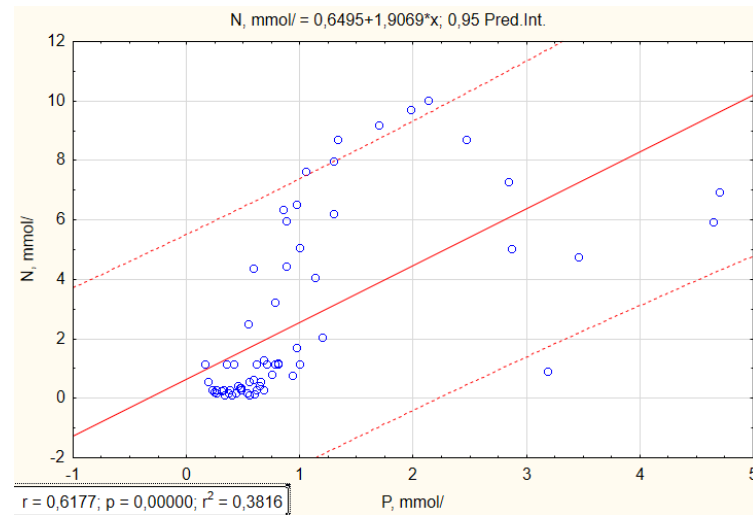


Рисунок 16.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2011

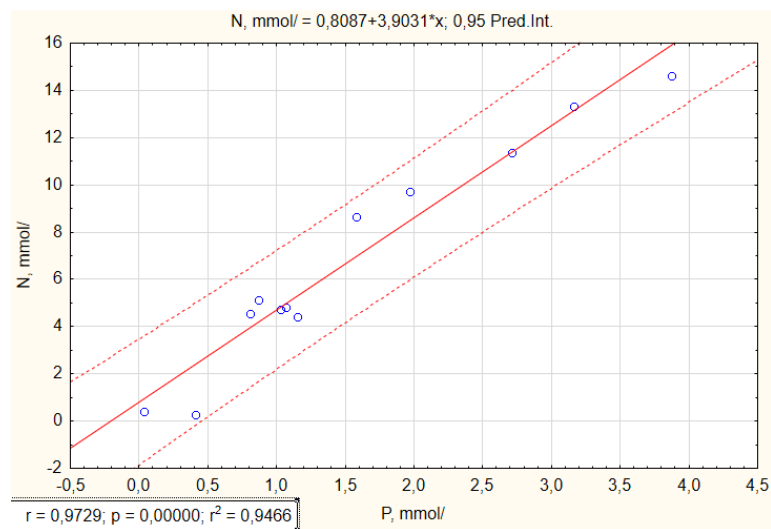


Рисунок 16.2 – N:P соотношение, восток, август, 2011

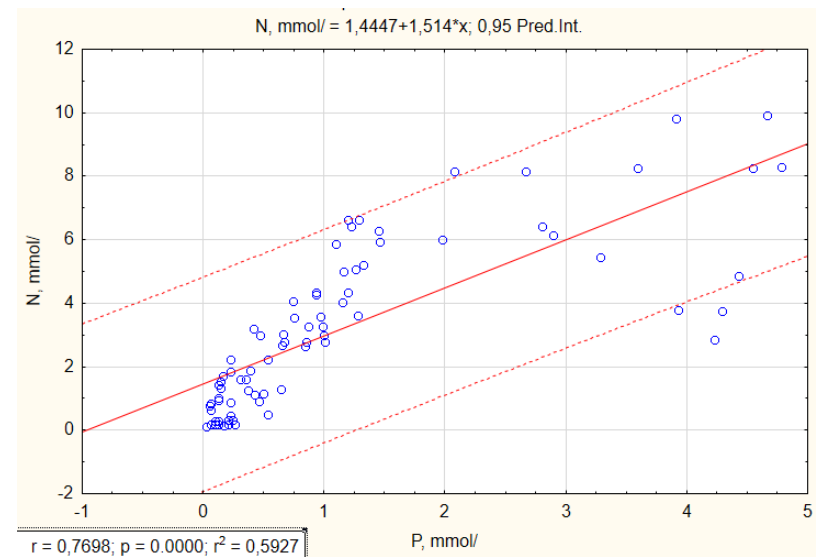


Рисунок 16.3 – N:P соотношение, запад, август, 2011

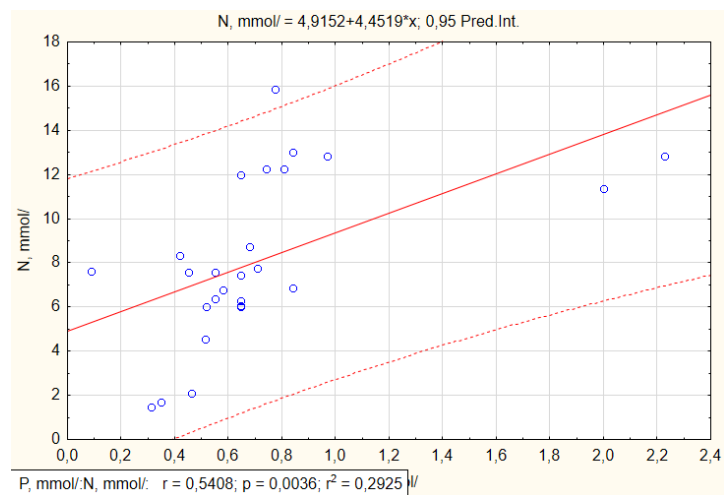


Рисунок 16.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2011

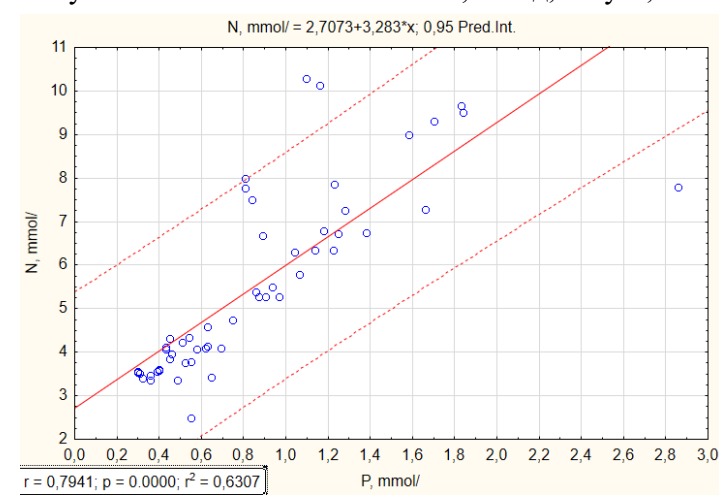


Рисунок 16.5 - N:P соотношение, запад, октябрь, 2011

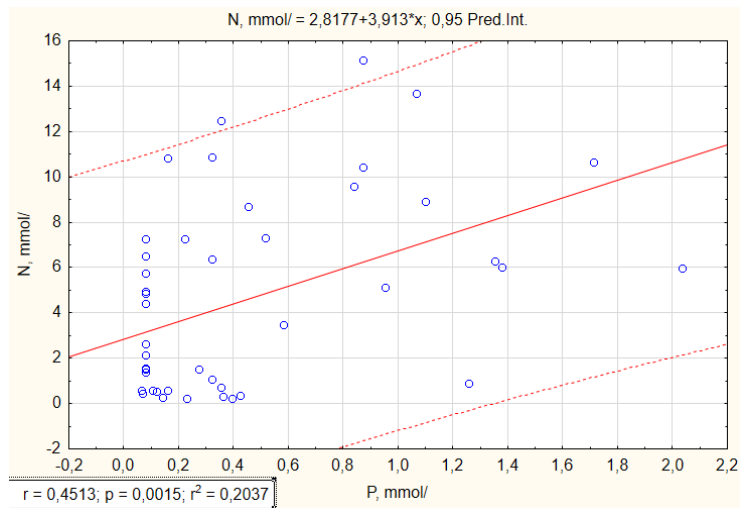


Рисунок 17 – N:P соотношение, восток, июнь, 2012

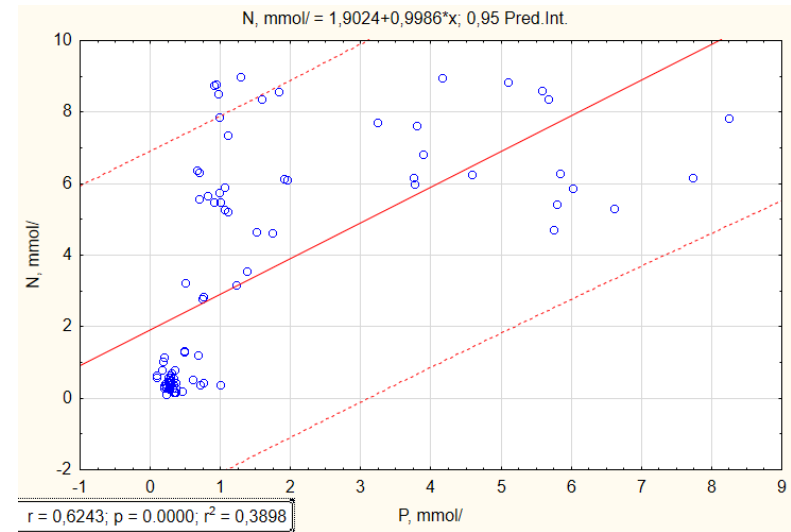


Рисунок 17.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2012

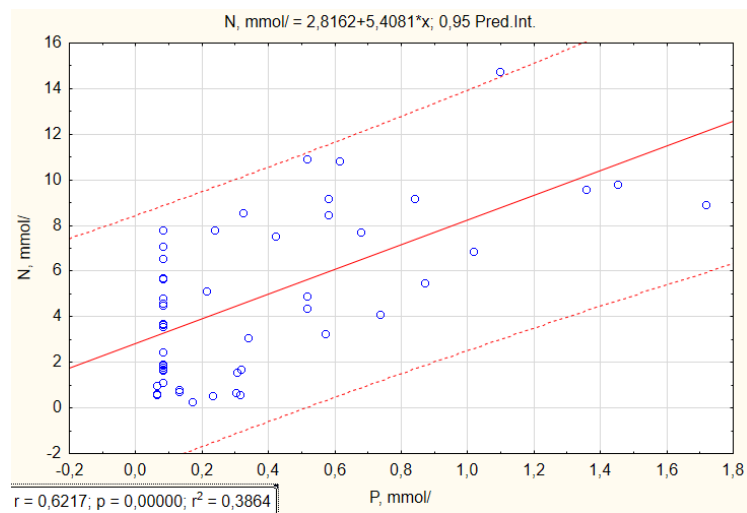


Рисунок 17.2 – N:P соотношение, восток, август, 2012

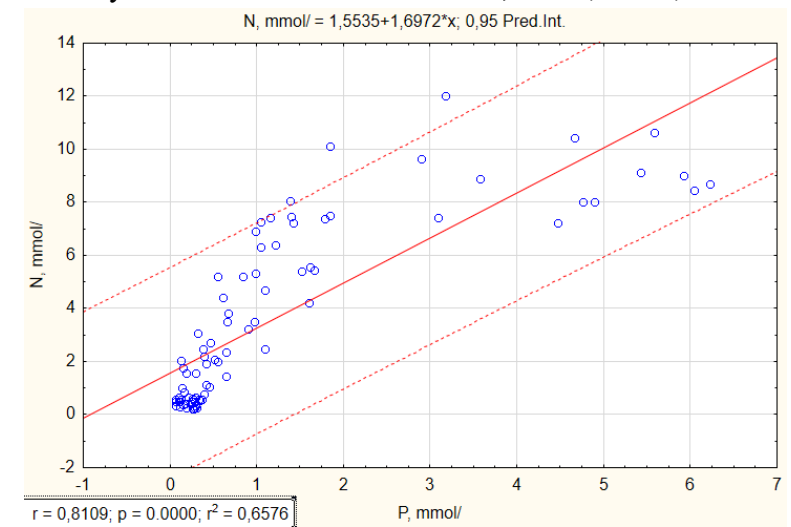


Рисунок 17.3 – N:P соотношение, запад, август, 2012

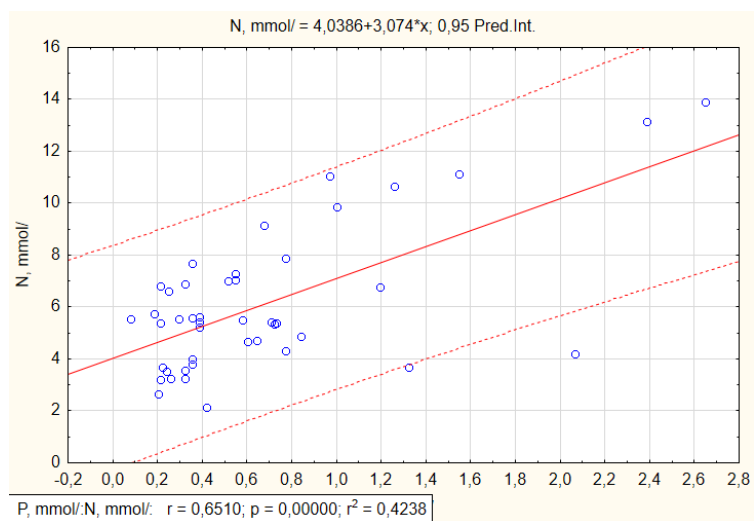


Рисунок 17.4 – N:P соотношение, восток, октябрь, 2012

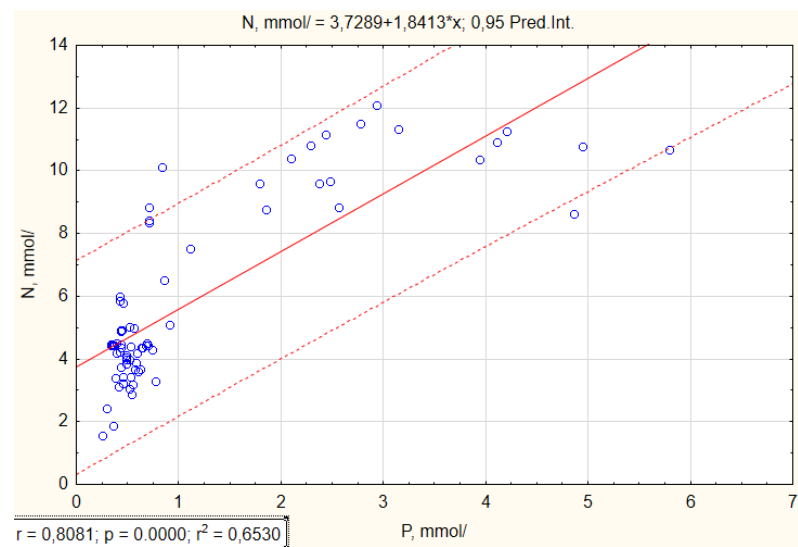


Рисунок 17.5 - N:P соотношение, запад, октябрь, 2012

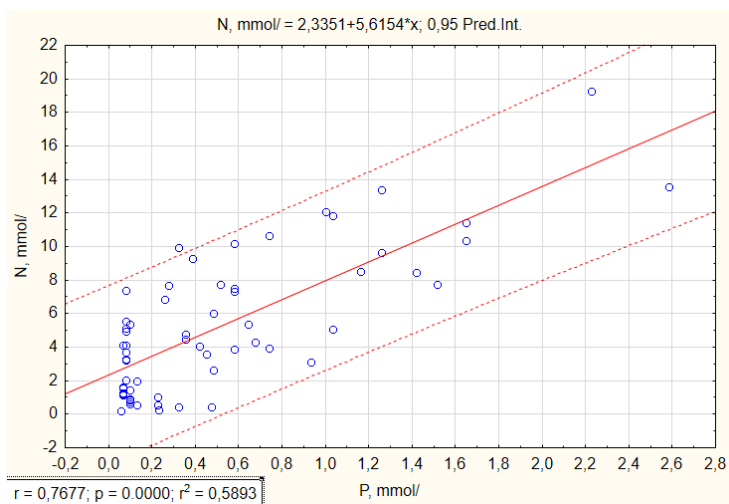


Рисунок 18 – N:P соотношение, восток, июнь, 2013

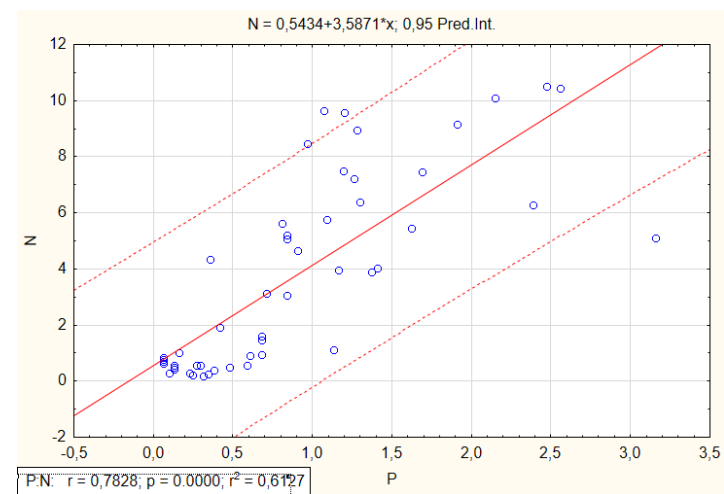


Рисунок 18.1 – N:P соотношение, запад, июнь, 2013

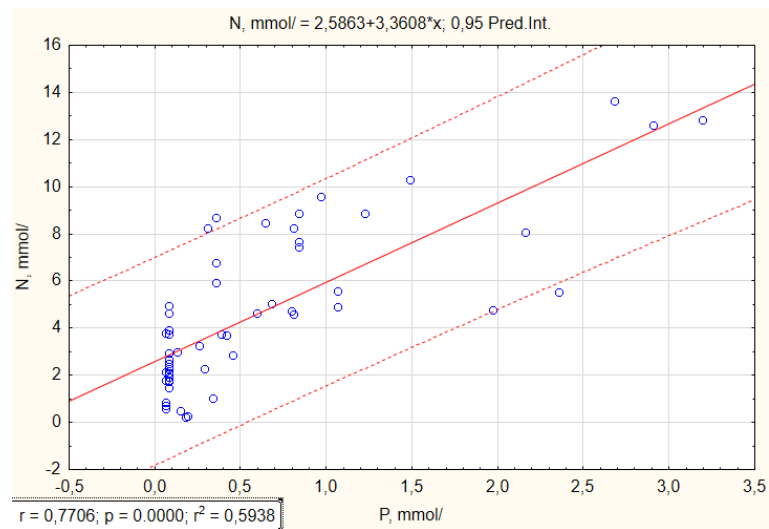


Рисунок 18.2 – N:P соотношение, восток, август, 2013

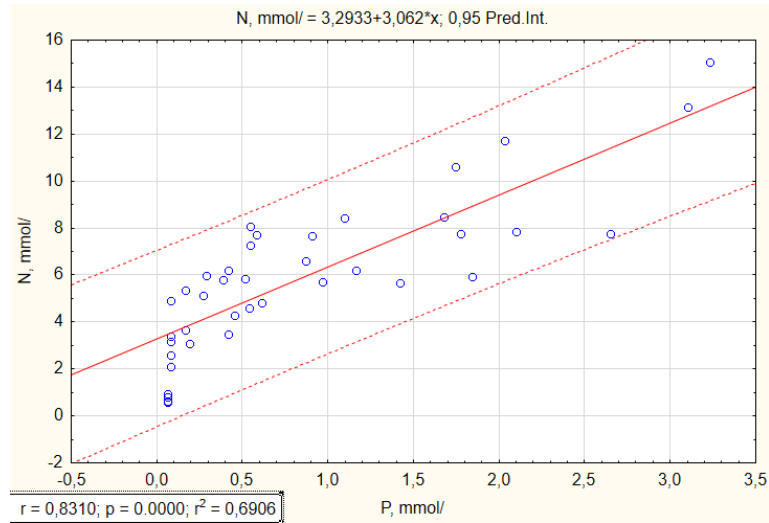


Рисунок 18.4 - N:P соотношение, восток, октябрь, 2013

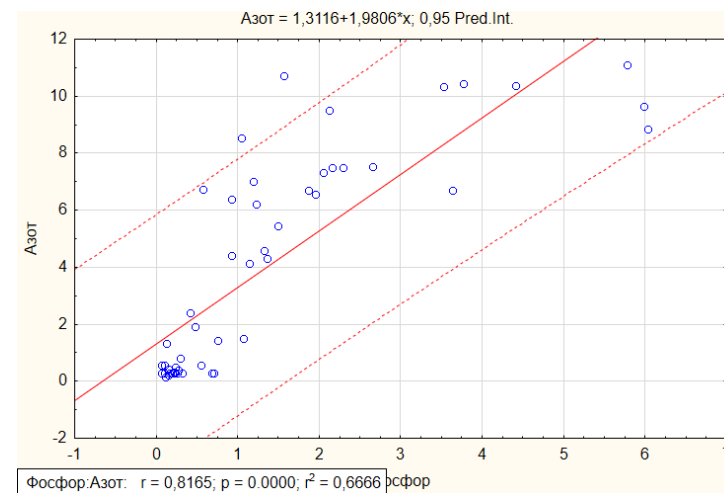


Рисунок 18.3 – N:P соотношение, запад, август, 2013

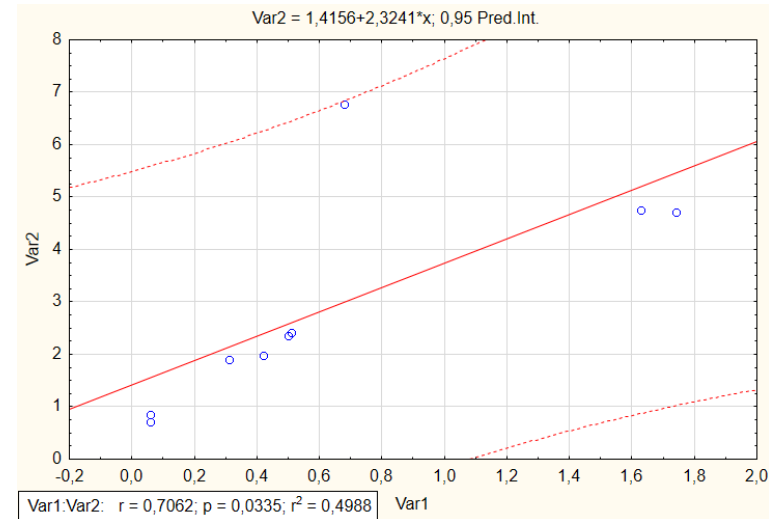


Рисунок 18.5 – N:P соотношение, запад, октябрь, 2013